

DOI: 10.7652/xjtuxb201707011

离心压缩机级通流与盘盖侧泄漏流的耦合分析

王晟旻^{1,2}, 琚亚平¹, 张楚华¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 100869, 沈阳)

摘要: 为揭示离心压缩机通流与轮盘及轮盖侧迷宫密封泄漏流动之间的耦合作用机理,以某天然气管线用离心压缩机首级为研究对象,数值分析了压缩机级在不考虑密封结构模型以及考虑密封结构模型下的流场分布。结果表明:在考虑密封结构的情况下,压缩机整级的等熵效率和总压比都有所下降,且在小流量工况时下降更为明显;等厚度高低密封齿和梯形密封齿均能有效衰减泄漏气流压力能和动能,从而有效降低泄漏量;密封通道内的泄漏气流在叶轮进出口与通流区气流掺混时易造成通流分离;受轮盖密封泄漏气流的影响,在叶轮进口轮盖侧存在明显的熵增区域,使得压缩机整级性能下降。研究作为深入了解离心压缩机密封流动结构及其对通流的影响、完善离心压缩机在实际运行状态下的气动性能预测模型奠定了坚实理论基础。

关键词: 离心压缩机;迷宫密封;级环境;通流;泄漏流动

中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)07-0073-05

Coupling Analysis between Through Flow and Hub-Shroud Side Leakage Flow of a Centrifugal Compressor Stage

WANG Shengmin^{1,2}, JU Yaping¹, ZHANG Chuhua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110869, China)

Abstract: In order to reveal the coupling interaction between centrifugal compressor's through flow and hub-shroud labyrinth seal leakage flow, the inlet stage of a centrifugal compressor in natural gas pipeline was studied in this paper. Numerical simulations of internal flow fields of the centrifugal compressor stage with and without labyrinth seal were carried out. The results showed that the model with seal has lower isotropic efficiency and total-to-total pressure ratio than the model without seal, especially at low flow rates. Both the seal cavities with the alternate long-short seal teeth of identical thickness and with the trapezoid seal teeth are capable of dissipating the gas pressure and kinetic energy into heat energy, thus significantly decreasing the leakage flow rate. The mixing of leakage flow and through flow can lead to the separation of through flow near inlet and outlet of centrifugal impeller. Subject to shroud-side leakage flow, the through flow near the impeller inlet suffers significant increase in entropy and hence a deterioration in the aerodynamic performance of the whole stage. The present work would provide a theoretical foundation for the in-depth understanding of the interaction between through flow and hub-shroud side leakage flow and for the improvement in the aerodynamic performance prediction model of the in-service centrifugal compressors.

Keywords: centrifugal compressor; labyrinth seal; stage environment; through flow; leakage flow

迷宫密封因具备结构简单、维修成本低等优点，被广泛应用于离心压缩机中，并对压缩机的运行效率、稳定性及安全性产生了显著影响^[1-2]。近些年来，国内外学者针对迷宫密封自身性能及其对离心压缩机性能的影响开展了大量研究^[3-4]。

在迷宫密封性能影响因素方面，Shimada 实验研究了直通型迷宫密封在较小的进出口压差和较大的密封间隙情况下的密封性能^[5]。Gamal 实验研究了迷宫密封的齿形和齿厚对密封泄漏量的影响，结果表明，厚度加倍和向下游倾斜的密封齿显著减少了密封的泄漏量^[6]。Suryanarayanan 等通过数值模拟得出迷宫密封的遗留系数不仅仅与密封的几何参数相关，受雷诺数影响更明显^[7]。周国宇等利用试验及数值模拟相结合的方法，研究了高低齿迷宫密封泄漏量与压比、转速的关系，并对原密封机构进行了优化^[8]。李志刚等研究了密封间隙、压比、转速对迷宫密封泄漏特性的影响规律，发现在间隙相同的情况下，密封的泄漏系数随压比的提高而近似线性增加；在相同的转速及压比下，相对泄漏量随密封间隙的减小而减小^[9]。为进一步研究迷宫密封泄漏流对压缩机通流区流动的影响，秦瑞鸿和 Sun 等数值研究了离心压缩机叶轮轮盘侧空腔内的流动结构以及泄漏流动对压缩机性能的影响^[10-11]。Mischo 等以某离心压缩机首级轮盖密封为研究对象，数值研究了轮盖密封出口方向、位置以及密封齿数对压缩机级性能的影响，结果表明：轮盖侧密封的泄漏流会扰乱叶轮进口盖侧的边界层，进而缩减压缩机的稳定工况范围，且轮盖侧密封出口的方向、位置以及密封齿数都存在最优值^[12]。

综上，目前大多数研究仍停留在迷宫密封及其对离心叶轮气动特性的影响，而针对级环境下密封泄漏及其影响的研究还较为匮乏，致使多级离心压缩机气动性能的预测精度受到严重制约^[13]。鉴于此，本文以某 4 级离心压缩机的首级为研究对象，采用 CFD 数值模拟，对比分析了离心压缩机在有、无轮盘及轮盖侧密封结构这两种模型下的级性能及内部流场，探索级环境下密封泄漏气流与通流区流动的相互影响机制。该研究更贴近离心压缩机的实际运行状态，对离心压缩机的理论研究和工程应用具有指导意义。

1 几何模型

本文研究对象为某天然气长输管线用 4 级离心压缩机的首级^[14]，几何结构如图 1 所示。其通流区

由叶轮、叶片扩压器、弯道和回流器组成，轮盖密封位于叶轮轮盖外侧，用来限制气体从高压的叶轮出口向低压的叶轮进口泄漏，密封为等厚度高低齿型式^[15]，在高齿的对应位置叶轮轮盖外侧有相应的沟槽，进一步增强气流在密封内的涡流。轮盘密封位于叶轮盘侧空腔与回流器出口连接处，限制气流从回流器出口向上一级叶轮出口回流。轮盘密封为等高度梯形齿^[15]，转轴表面在每个密封齿对应的轴向位置开有沟槽，来减小密封内的直吹效应。表 1 列出了这两种密封的关键几何参数。

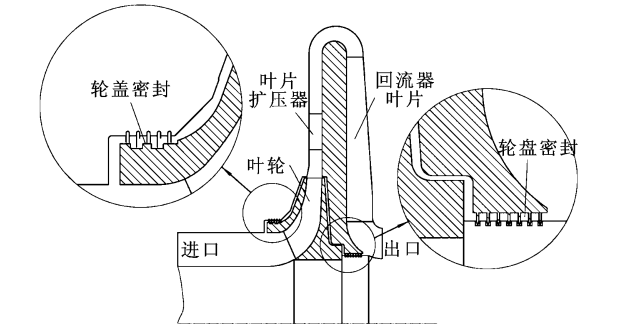


图 1 考虑密封结构的第 1 级几何模型

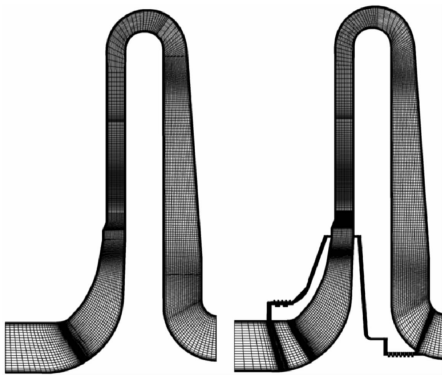
表 1 密封几何参数

密封位置	齿高/mm	齿数	齿距/mm	径向间隙/mm
轮盖	4.8	2	9.0	0.6
	2.8	8	4.5	0.6
轮盘	5.0	7	4.5	0.6

2 计算模型

根据上述离心压缩机首级的几何模型，建立两组单通道计算模型如图 2 所示。在计算模型 A 中，仅包含压缩机首级的通流部件，忽略密封结构；模型 B 包含首级通流部件以及轮盘和轮盖侧密封结构。

采用商用 CFD 软件 NUMECA 求解三维 RANS



(a)模型 A (b)模型 B

图 2 两种计算模型的网格划分

方程,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型。采用有限体积法对方程进行离散,其中对流项采用二阶中心格式结合人工黏性法离散,黏性项采用二阶中心格式进行离散,并采用 4 阶显式 Runge-Kutta 法进行时间推进^[16-18]。整机计算模型进口给定总温 $T_{t,in}=293.15$ K,总压 $P_{t,in}=39$ MPa,沿轴向进气;出口给定质量流量;壁面及周期性边界分别满足无滑移绝热条件和旋转周期性条件。近壁区第 1 层网格节点距离壁面的归一化高度 y^+ 为 50 左右。计算介质为天然气,使用 NIST 软件,根据压缩机输运的天然气组分计算得出天然气物性参数。在保持计算模型 A 网格不变的条件下增加轮盖及轮盘密封通道网格,生成计算模型 B 的计算网格,其中在叶轮入口与回流器出口处,密封网格和通流区网格为匹配连接,在叶轮出口处,密封网格和通流区网格为完全非匹配连接。经过网格无关性验证,计算模型 A 的网格数约为 200 万,计算模型 B 的网格数约为 460 万。

3 级性能计算与分析

根据上述两种计算模型,得到该压缩机首级在近端、近堵及设计工况下的效率和压比,结果如表 2 所示。对比两种计算模型所得结果,发现考虑密封泄漏后,级总压比和等熵效率有所下降。在设计工况下,压缩机泄漏对级性能影响不大,但近端工况下级等熵效率下降了 7.31%,可见在小流量工况下,压缩机密封泄漏对级性能的衰减作用更为显著,与只考虑轮盘侧轴端密封情况有所不同^[5]。这是由于在小流量工况下,内泄漏和级间泄漏损失占比更大,因而在对小流量系数离心压缩机级的设计及性能预测过程中,应充分考虑压缩机密封泄漏的影响。

表 2 第 1 级有无密封结构性能对比

工况	密封	等熵效率/%	压比
近端	无	83.71	1.310
	有	76.40	1.290
近堵	无	79.47	1.260
	有	74.60	1.246
设计	无	86.99	1.295
	有	84.83	1.270

4 密封内流动分析及其对通流区影响

4.1 轮盘侧密封内部流动分析

图 3 为叶轮盘侧密封在近端工况、设计工况及近堵工况下的周向平均静压分布,可以看出在 3 个

工况下,泄漏气流流经多个密封齿后静压明显下降,可见轮盘侧密封有效地抑制了级间的泄漏流动。

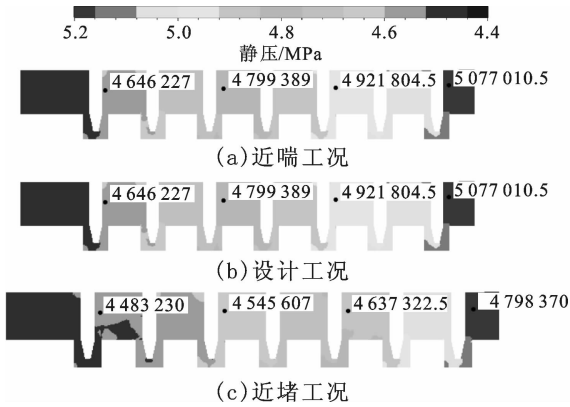
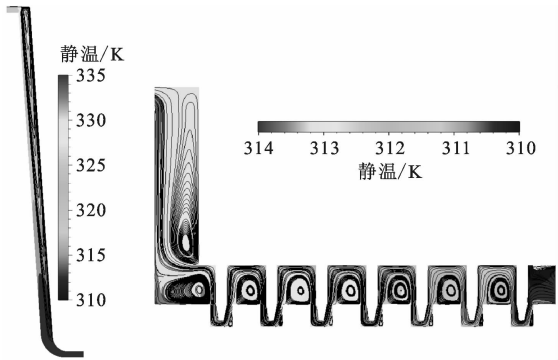


图 3 轮盘侧密封周向平均静压分布

从图 4a 所示的设计流量轮盘侧空腔周向平均流线图可以看出,在轮盘侧空腔内存在一个占据整个空腔范围的旋涡,其主要由叶轮盘侧壁面旋转而产生的离心力和空腔内的压力梯度形成,此涡可以消耗泄漏流动的动能以减少级间泄漏量。图 4b 为设计流量轮盘侧密封内周向平均流线,可以看出,每个密封腔内都存在一个旋涡,其占据了密封腔的大部分空间,使泄漏气流压力能和动能耗散为热能,并在下一个密封腔内继续耗散,从而达到抑制泄漏的效果。从图 4 还可以看出,沿泄漏方向由于密封腔内气流的有效能量经过旋涡耗散并转化为热量,气体温度上升。



(a) 轮盘侧空腔 (b) 轮盘侧密封

图 4 轮盘侧密封周向平均流线及温度分布

4.2 轮盖侧密封内部流动分析

在轮盖侧,叶轮出口的高压气体沿叶轮轮盖与隔板间隙向叶轮进口泄漏。图 5 为近端工况、设计工况、近堵工况下轮盖密封通道内周向平均静压分布,可以看出 3 个工况下,在密封前的环形通道内气流静压基本没有变化,但泄漏气体流经密封腔后静压迅速下降,经过最后一个密封齿后气流静压已接

近叶轮进口静压。图 6 为设计工况下轮盖密封内的周向平均流线分布,可见轮盖密封腔内存在多个旋涡结构,气流经过密封齿加速后流入密封腔快速膨胀,并在密封腔内形成旋涡耗散压力能和动能。遍布密封腔内的旋涡流动消耗了泄漏气流的压力能和动能并转换为热能,抑制了叶轮轮盖间隙的泄漏量。

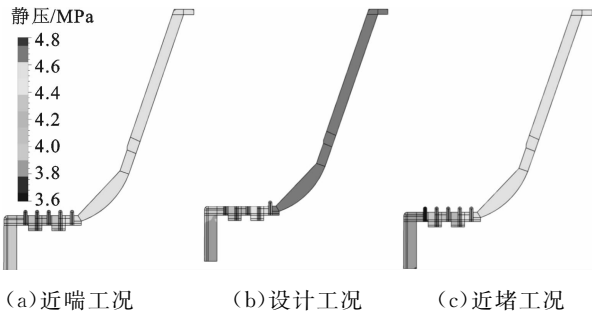


图 5 轮盖侧密封周向平均静压分布

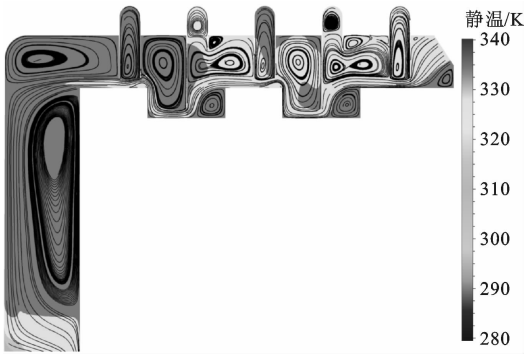


图 6 轮盖侧密封腔周向平均流线及温度分布

4.3 级环境下泄漏对通流区流动的影响

为研究泄漏流对通流区流动的影响,图 7 对比了两种计算模型在近端工况下压缩机叶轮 10%叶高截面上的熵增分布。从图中可以看出,受轮盘侧密封通道流动影响,在叶轮 10%叶高截面上,叶轮出口位置存在更明显的熵增区,对应流动损失增大,同时叶轮出口附近沿周向的流场分布也更加不均匀。

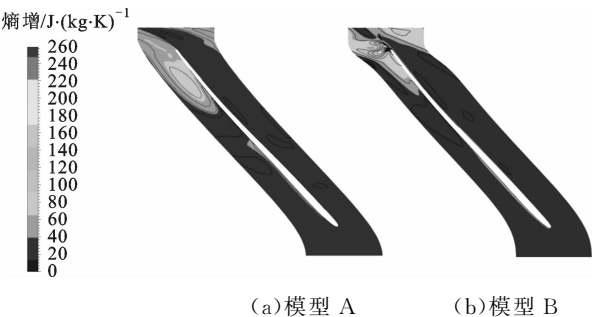


图 7 两种模型近端工况下叶轮 10%叶高截面的熵增分布

图 8 给出了两种计算模型在近端工况下压缩机叶轮 90%叶高截面上的熵增分布对比情况。如图所示,在考虑密封泄漏影响的情况下,叶轮 90%叶高截面内的熵增尤为明显,且熵增区域几乎覆盖整个叶轮流道,对应流动损失增大、流场更加恶化。图 9 进一步给出了两种模型所得叶轮进口附近的周向平均流线图,通过对比可以看出,盖侧密封通道出口的旋涡流加剧了叶轮进口流动沿叶高方向的非均匀性,且在叶轮叶片进口轮盖侧存在局部流动分离现象。



图 8 两种模型近端工况下叶轮 90%叶高截面的熵增分布

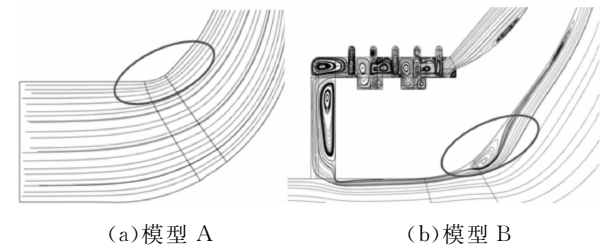


图 9 叶轮周向平均流线图

综上,压缩机泄漏流动对级性能的影响除了泄漏损失以外,对通流区的流场也存在不利影响:轮盘侧密封通道出口与叶轮出口相连、轮盖侧密封通道出口与叶轮进口相连,经由密封通道流出的低动能旋涡流与叶轮进出口通流气体相掺混,由此产生掺混损失,进而增大流动损失;同时气流掺混也加剧了叶轮进出口流场的非均匀性,给叶轮及整级气动性能带来了不利影响。

5 结 论

(1)对比分析了考虑密封结构与不考虑密封结构的离心压缩机首级性能,发现考虑密封泄漏后级等熵效率和总压比都有所下降,在小流量工况中下降尤为明显。

(2)通过对轮盘及轮盖密封内流场的分析,发现本文研究的等厚度高低密封齿和梯形密封齿内的泄漏气流静压衰减明显,迷宫密封的沟槽与高低齿结

构可以有效地减少泄漏量。

(3)密封通道内的泄漏气流在叶轮进出口与通流区流体掺混时会造成通流区流动分离,使得离心压缩机级性能下降,尤其是受轮盖密封泄漏气流影响,在叶轮进口轮盖侧存在明显的熵增区域。

参考文献:

- [1] 宁喜,王维民,张娅,等. 离心式压缩机密封动态特性分析及稳定性评价 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 153-158.
NING Xi, WANG Weimin, ZHANG Ya, et al. Dynamic performance analysis of seals in a centrifugal compressor and rotor stability evaluation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13): 153-158.
- [2] 李军,晏鑫,宋立明,等. 透平机械密封技术研究进展 [J]. 热力透平, 2008, 37(3): 141-148.
LI Jun, YAN Xin, SONG Liming, et al. A review of sealing technologies in turbomachinery [J]. Thermal Turbine, 2008, 37(3): 141-148.
- [3] XU L Q, WANG Z H, XI G. An improvement of labyrinth seal in shroud of centrifugal compressor with low flow coefficient [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(7): 1131-1134.
- [4] MARECHALE R, JI M, CAVE M. Experimental and numerical investigation of labyrinth seal clearance impact on centrifugal impeller performance [C]// ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, New York, USA: ASME, 2015: V02CT 42A035.
- [5] SHIMADA K, KIMURA K, OHTA H, et al. Phenomenon of labyrinth seal with low static pressure difference and large clearance: prediction of performance and experimental result [J]. Journal of Visualization, 2003, 6(4): 395-405.
- [6] 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.
- [7] SURYANARAYANAN S, MORRISON G L. Analysis of flow parameters influencing carry-over coefficient of labyrinth seals [C]// ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2009: 1137-1145.
- [8] 周国宇,王旭东,林智荣,等. 高低齿迷宫密封泄漏量实验及计算分析 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9): 1889-1893.
ZHOU Guoyu, WANG Xudong, LIN Zhirong, et al. Preliminary analysis to the leakage of the staggered labyrinth seal based on experiment and simulation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9): 1889-1893.
- [9] 李志刚,李军,丰镇平. 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 16-20.
LI Zhiang, LI Jun, FENG Zhenping. Effects of gap pressure ratio and rotational speed on discharge behavior of labyrinth seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 16-20.
- [10] 秦瑞鸿,孙一颀,王晟旻,等. 轮盘侧空腔流动结构及其对离心压缩机气动性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(11): 2349-2354.
QIN Ruihong, SUN Yijie, WANG Shengmin, et al. Flow structure in impeller backside cavity and its effect on aerodynamic performance of a centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2349-2354.
- [11] SUN Z, TAN C, ZHANG D. Flow field structures of the impeller backside cavity and its influences on the centrifugal compressor [C]// ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2009: 1349-1360.
- [12] MISCHO B, RIBI B, SEEBASS-LINGGI C, et al. Influence of labyrinth seal leakage on centrifugal compressor performance [C]// ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2009: 1283-1293.
- [13] DAY I. Stall, surge and 75 years of research [J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 138(1): 011001.
- [14] 王晟旻. 离心压缩机级间影响及泄漏特性分析 [D]. 西安: 西安交通大学, 2016.
- [15] 李燕坡,王吉鹏,曹彦恒,等. 离心式压缩机密封技术的应用综述 [J]. 风机技术, 2011, 53(6): 58-62.
LI Yanpo, WANG Jipeng, CAO Yanheng, et al. Overview of the application of centrifugal compressor seal technology [J]. Compressor Blow & Fan Technology, 2011, 53(6): 58-62.
- [16] 张楚华,琚亚平. 流体机械内流理论与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 105-144.
- [17] JU Y P, ZHANG C H. Design optimization and experimental study of tandem impeller for centrifugal compressor [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(6): 1490-1501.
- [18] JU Y P, ZHANG C H, CHI X L. Optimization of centrifugal impellers for uniform discharge flow and wide operating range [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(5): 888-899.

(编辑 荆树蓉 苗凌)