

天然气井多级压缩机内部流动特性研究

装备2102班：耿麒 指导教师：程嘉瑞 论文类型：毕业设计

摘要：本研究针对天然气井多级轴流式压缩机的内部流动特性进行了深入的数值模拟与分析。通过构建单级和多级轴流式压缩机的三维几何模型，利用滑移网格技术和RNG- $k-\varepsilon$ 湍流模型，对压缩机内部流场流动特性进行了详细的数值模拟与分析。研究重点分析了不同工况下，包括入口压力、叶轮转速、进口温度和含水率等参数对压缩机性能的影响。模拟结果揭示了压缩机内部压力场、速度场和温度场的分布规律，并探讨了各独立因素对压缩机性能的影响。此外，本研究还对井下多级轴流式压缩机的经济性进行了评估，与传统地面增压系统相比，井下增压系统展示了其在提高采收率和降低能耗方面的显著优势。研究结果为混相多级轴流式压缩机的优化设计和工艺参数的调整提供了理论依据，并为天然气井下气液增压混输系统的开发提供了新的技术方向。本研究不仅丰富了轴流式压缩机内部流动特性的研究内容，也为天然气高效开采提供了重要的技术支持。

关键词：天然气开采；轴流式压缩机；数值模拟；气液两相流动；流动特性

1 研究背景

天然气作为一次能源中最清洁的能源，其高效开发对我国经济社会发展具有重要战略意义。然而，随着气田开发进入中后期，会面临两大技术难题：一是井底压力衰减导致产能下降，二是气水干扰影响开采效率。当前主流的地面增压技术虽能提高采收率，但存在井口压力损失大、资源浪费等问题。为此，国际业界开始聚焦井下气体压缩技术，通过将压缩机嵌入井筒近气藏位置，有效提升气体密度、降低流速，从而减少管阻、延长气井寿命。该技术相比传统方法更具经济性，英国TP Group和美国Upwing公司已实现技术验证，但在电力传输、高温电机、轴承可靠性等核心环节仍存在挑战。作为新兴的人工举升技术，井下气体压缩有望成为未来天然气高效开采的重要方向，但目前国内相关研究尚属空白，亟需加快技术攻关以实现资源的高效开发利用。

2 轴流式压缩机内部气液流动规律分析

2.1 轴流式压缩机内部流场数值模型建立

本文将研究对象简化为与所设计多级轴流式混相压缩机第一级几何尺寸相近的单级轴流式压缩机，并确定压缩机内部流动守恒模型、气液输送流动模型、湍流模型，建立三维几何模型如图2-1所示：

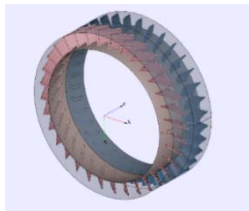


图2-1 单级轴流式压缩机模型

2.2 网格划分及边界条件设置

2.2.1 网格划分

针对计算模型的几何特征，对流体域实施了结构化离散处理，单通道网格数量为179568个。

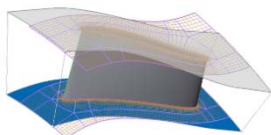


图2-2 近叶片壁面区域网格（转子）

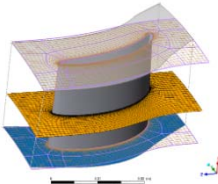


图2-3 近叶片壁面区域网格（定子）

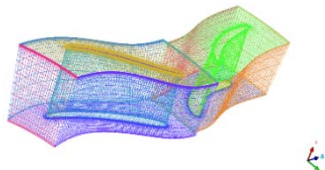


图2-4 叶片及叶片通道网格

2.2.2 边界条件设置

本研究将进口延伸段与静子流道区域定义为静止参考系，而转子通道则设置为旋转参考系。所有边界条件的详细参数设置参见表2-1所列数据，其余未特殊说明的参数均保持软件默认配置。

表2-1 参数设置

选项	名称		参数
流体属性	天然气	进口密度	115.3 kg/m ³
		动力粘度	1.2e-05 Pa.s
		平均比热	2250 J/(kg.K)
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$ 模型		Realizable $k-\varepsilon$
初始条件		速度	75 m/s
		进口温度	333.15 K
		流量	6.4 kg/s
入口类型	压力入口		20000000 Pa
入口类型	压力出口		20000000 Pa
计算方法	压力速度耦合		Coupled
时间类型	瞬态		/

2.3 单级轴流式压缩机流场数值模拟分析

在完成Fluent数值模拟过程所有前置参数设置后，启动瞬态求解器开始求解单级轴流式压缩机的内部流场流体流动情况，得出该单级轴流式压缩机内部流场的速度场分布、温度场分布、压力场分布的云图和散点图并进行可视化处理和分析。各变量云图、散点图、矢量图如图所示。

结果表明，压缩机内部压力场、速度场及温度场分布与理论预期一致，验证了数值模拟方法的可靠性，具体结果为：在入口压力为20 MPa、转速为10000 rpm的工况下，出口动压达0.94 MPa，出口速度425 m/s，温度升高至520 K，压力梯度与速度分布规律符合叶轮机械能量传递特性。

3 轴流式压缩机影响因素分析

3.1 入口压力对压缩机性能影响因素分析

在其他参数不变时，压缩机入口压力升高（20~35 MPa）会导致压缩机内部压力梯度、速度梯度和温度梯度增大，压缩机内部高压、高速及高温区域范围扩大，流动分离和涡流现象加剧，压力、速度和温度分布的不均匀性增强。

3.2 叶轮转速对压缩机性能影响因素分析

在其他参数不变时，压缩机叶轮转速提升（10000~16000 rpm）会使压缩机内部压力梯度和温度梯度增大、流体流速显著提高、内部流场高压区域扩大，同时，随着压缩机叶轮转速的提升，压缩机转子压力表面附近流速分布更均匀，背压面推动作用增强导致尾迹现象减弱甚至消失，同时流动分离和涡流对温度分布的影响加剧。

3.3 进口温度对压缩机性能影响因素分析

在其他参数不变时，压缩机入口温度升高（333~400 K）会使压缩机内压力和速度分布更均匀，压力梯度和速度梯度减小，随着压缩机入口温度的升高，流体黏度降低，从而导致流动分离和涡流现象的减少，同时，压缩机内部流场的整体温度呈非线性升高且高温区域稍有扩大，但温度梯度分布基本保持一致，叶顶间隙等局部区域出现温度梯度增大和过热现象。

3.4 入口流量对压缩机性能影响因素分析

在其他参数不变时，压缩机入口流量增加（4.8~12.8 kg/s）会使压缩机内部压力梯度和速度梯度显著增大，流动分布不均匀性增强，随着入口流量的升高，流体动能增加导致流动分离点后移，但同时加剧了剪切层不稳定性和湍流脉动，使得涡流现象更加显著。同时，压缩机内部高压区和高速区范围明显扩大，流场整体温度升高且高温区域稍有扩展，而温度梯度分布基本保持不变，但在叶顶间隙等局部区域出现温度梯度增大和过热风险。

4 轴流式压缩机多相流流场特性研究

4.1 含水率对压缩机性能影响分析

含水率对压缩机流场内部特性的影响：

（1）高压区分布基本不随含水率变化，动压随含水率增加小幅上升，但增幅在15%的含水率后趋于稳定，表明高含水率下压力分布的不均匀性减弱。

（2）高速区集中在叶片吸力面，含水率增加使整体流速略有提升，但梯度变化不显著，15%以上含水率的影响趋于饱和。

（3）高温区分布于叶片前缘及压力面，含水率增加导致温度微幅上升，但最低温度随含水率增加而降低，可能与水蒸气吸热相关。

（4）甲烷向压缩机尾部内侧聚集，水蒸气向外侧迁移，符合离心力作用下的密度分层规律。含水率增加使水蒸气在低压区占比显著提高。

4.2 多相流工况下叶轮转速对压缩机性能影响分析

叶轮转速对压缩机流场内部特性的影响：

（1）高压区分布基本不变，但动压随转速增加小幅降低，尤其在10000~15000 rpm区间变化显著，20000 rpm后降幅趋缓，表明高转速下压力分布趋于动态平衡。

（2）高速区占比随转速增加而减少，整体流速小幅降低，可能与高转速下流动分离加剧有关。

（3）高温区占比随转速增加而减少，但整体温度呈上升趋势，尤其在20000 rpm以上增速明显，表明高转速下机械能转化热效应增强。

（4）高转速强化离心效应，甲烷向压缩机内侧富集程度提高，水蒸气向外侧迁移更显著，转速25000 rpm时组分分离现象最为明显。

5 结论与展望

（1）通过构建多级与单级轴流式压缩机三维几何模型，采用滑移网格技术与RNG- $k-\varepsilon$ 湍流模型，实现了动网格转动流场的非定常模拟。

（2）研究得出关键因素对轴流式压缩机性能的影响规律。

（3）研究得出关键因素对混相条件下轴流式压缩机性能的影响规律。