

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2023.03.012

文章编号:1672-3767(2023)03-0103-08

畸变进气对对旋风机单级运行内流特性及性能的影响

陈庆光,张祯江,徐延辉,郭 武

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为对压入式矿用对旋风机在畸变进气条件下单级运行方案的合理选择提供理论依据,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对风机前级和后级叶轮单独运行情况下的内部流场进行非定常数值模拟,分析了均匀和畸变两种进气条件下单级叶轮运行时的内流特性,对比了全压和全压效率等风机性能参数。结果表明:当前级叶轮单级运行时,畸变进气对流动的影响集中在前级叶轮上游区域,前级叶轮出口直至扩散器区域内流动扰动较小;后级叶轮单级运行时,畸变进气加剧了前级叶轮作为前导叶对后级叶轮区域内流动产生的不利影响,两级叶轮内熵损失较均匀进气条件显著增大,扩散器内的湍流程度加剧。与后级叶轮单级运行相比,前级叶轮单级运行受畸变进气影响而导致的流动损失较小,全压效率提高约 11%。

关键词:对旋风机;畸变进气;单级运行;流动特性;风机性能

中图分类号:TH431

文献标志码:A

Influence of inlet distortion on internal flow characteristics and performance of contra-rotating fan in single-stage operation

CHEN Qingguang, ZHANG Zhenjiang, XU Yanhui, GUO Wu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the rational selection of the single-stage operation scheme of forced mine contra-rotating fans under inlet distortion, this study first conducted an unsteady simulation of the internal flow field of the fan's front-stage and rear-stage impellers operating independently by using the SST $k-\omega$ turbulence model. It then analyzed the internal flow characteristics of the single-stage operation under uniform and inlet distortion conditions and compared the performance parameters of the fan such as full pressure and full pressure efficiency. The results show that the influence of the inlet distortion on the flow is concentrated in the upstream area of the front-stage impeller whereas the flow disturbance in areas from the outlet of the front-stage impeller to the diffuser is small when the front-stage impeller is in operation. However, when the rear-stage impeller operates, the inlet distortion exacerbates the adverse effect of the front-stage impeller as the front guide vane on the flow in the region of the rear-stage impeller. Compared with the uniform intake condition, the two-stage impeller entropy loss increases significantly and the turbulence of flow in the diffuser is increased. The flow loss caused by the influence of inlet distortion in the front-stage impeller operation is less than it is in the rear-stage operation and the full pressure efficiency is improved by about 11%.

Key words: contra-rotating fan; inlet distortion; single-stage operation; flow characteristics; fan performance

对旋风机具有结构紧凑、运行效率高、反风性能好等优点,近 20 年来作为我国大型煤矿井下主流通风设

收稿日期:2022-04-14

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME242)

作者简介:陈庆光(1969—),男,山东莒南人,教授,博士生导师,主要从事流体机械内流的数值与实验等研究。

E-mail:chenqg@sdust.edu.cn

备被广泛应用。一般来说,在矿井生产初期井下通风对风量、风压的要求低,为减少能源浪费可采用单级叶轮运行的方式。对于以压入式工作的风机,畸变进气的情况不可避免^[1-2]。因此,如何提高畸变进气条件下对旋风机单级运行的性能就成为亟待解决的问题。

在对旋风机单级运行方面,王军等^[3]对风机前级叶轮单级运行和后级叶轮单级运行情况进行数值模拟,通过分析两级叶轮间内流干涉效应表明,后级叶轮的做功能力受前级叶轮出口气流角影响更大,这与实验得到的气动性能结果相符合,表明数值模拟方法对对旋风机单级运行进行性能分析具有较高的精度和可靠性。Manas等^[4]以一种低展弦比、低轮毂比的对旋轴流风机为研究对象,测试了风机前级叶轮供电、后级叶轮被动旋转和后级叶轮供电、前级叶轮被动旋转两种运行状态,发现风机两级叶轮单级运行时,叶片表面的平均总压均有所下降,而叶轮区域失速等不稳定现象分别起始于叶顶与叶根位置,并沿叶展方向向叶中发展。在研究进气畸变对叶轮机械的内流特性及性能影响方面,赵梓岑等^[5]研究了静叶布置方式对均匀和畸变进口条件下压气机性能的影响,发现非轴对称静叶改善了流道端区流动,并分析了其对畸变进气条件下流道通流能力的影响规律;张皓光等^[6]研究发现在进口总压畸变条件下叶片内气流进气角降低明显;朱勉顺等^[7]分析了风机单级运行下的内部流场,发现叶片压力分布不均匀,后级叶片表面载荷增大,导致整机受压不稳定;Shahriyari等^[8]研究了对旋风机不稳定工作情况下,两级叶轮转速比对风机性能的影响,结果表明,前级叶轮转速越高对节流引起的喘振越明显。虽然上述成果分析了叶轮机械在单级运行时的内流特性及性能,但大都集中在均匀进气和稳定工况下的内部非定常流动方面^[9-11],缺少针对压入式对旋风机在复杂畸变进气条件下单级运行研究。

本研究以国内矿井现场广泛使用的压入式对旋风机为研究对象,考虑其安装片式消声器及90°矩形截面弯管后产生的复杂进气畸变情况,对风机前、后级叶轮单级运行时的内部流场进行数值模拟,并通过与均匀进气条件对比,研究畸变进气对设计工况下风机单级叶轮运行时的内流特性与风机性能的影响,降低煤矿现场畸变进气试验发生安全事故风险的同时,揭示畸变进气对风机单级运行气动特性和稳定性的影响机理,为对旋风机在畸变进气条件下单级运行方案的合理选择提供理论依据。

1 流场计算模型及数值模拟方法

1.1 风机流场几何模型及网格划分

本研究以FBCDZ-10-No20型矿用对旋风机为研究对象,整机结构如图1所示,主要包括片式消声器、90°矩形截面弯管、集流器、前级叶轮、后级叶轮、扩散器等。其中,叶轮轮毂直径为2000mm、轮毂比为0.62,前级叶片数为19、后级叶片数为17,叶轮额定转速为980r/min。

根据几何建模、网格划分和模拟计算的需要,在不显著影响模拟结果的前提下,对风机装置几何模型的局部结构进行简化处理,划分为6个计算子区域:进气片式消声器、90°矩形截面弯管、集流器入口段、前级叶轮、后级叶轮和扩散器,为畸变进气型式下的计算域。均匀进气型式计算域为去除消声器和矩形弯管之外的4个计算子区域,如图2(a)所示。

考虑到模拟计算的耗时与精度,用六面体单元对对旋风机全流道进行结构化网格划分,选择网格数约617万的结构化网格进行数值模拟。动叶区域采用H-O-H型拓扑,并对两级叶轮的轮毂、前缘及尾缘区域进行局部网格加密,如图2(b)所示。为了满足剪切应力输送(shear-stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型对网格精度的要求,对于叶片表面、轮毂以及机壳壁面,令第一层网格节点到壁面的无量纲距离值均小于20。

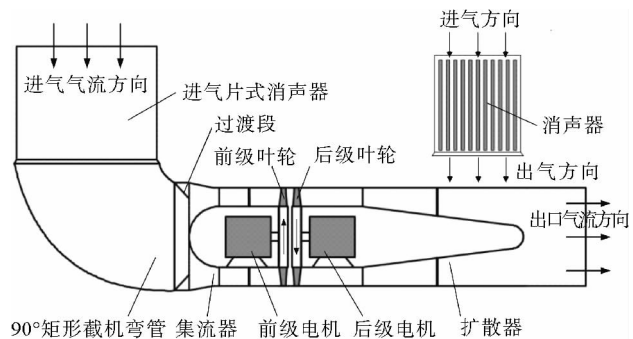


图1 对旋风机整机结构示意图

Fig. 1 Diagram of the whole structure of the contra-rotating fan machine

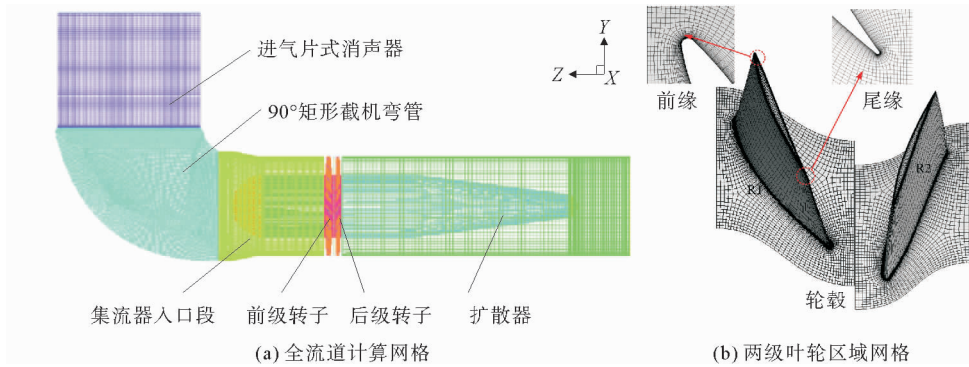


图 2 风机网格划分

Fig. 2 Grid division of the contra-rotating fan

1.2 边界条件设置

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭求解三维雷诺平均方程,均匀与畸变进气条件的进口边界分别为集流器进口(进气方向为 Z 轴负方向)和片式消声器进口(进气方向为 Y 轴负方向),均给定进口相对总压为 0;出口边界均为扩散器出口,给定质量流量 35 kg/s ;叶片表面、轮毂、机壳壁面等均采用无滑移条件。对于动-静交界面,定常计算时使用冻结转子-静子法完成数据传递,非定常计算时使用瞬态转子-静子法;其余边界条件与定常计算一致。非定常计算的时间步长为 0.0003 s ,即在 1 个时间步长内叶轮转过 1.8° ,每个时间步内设置 20 个迭代步。为提高收敛速度,非定常计算以定常计算的收敛结果作为初场。

2 结果分析

2.1 风机内部流动特征分析

图 3 为畸变进气条件下两级叶轮单级运行时风机内部非定常流场的流线分布。由于单级叶轮旋转做功,气流在流道内做轴向横流的同时又随着叶轮做周向旋转,而偏转气流得不到另一级叶轮反向旋转的整流作用,致使气流最终在扩散器内呈现沿轴向旋转的运动状态^[12]。

风机前级叶轮单级运行时,后级叶轮固定充当后导叶,如图 3(a)所示,集流器进口段流场相对稳定,出口段受前级叶轮叶顶区域反流的影响,机壳附近的气流流动相对混乱。伴随着前级叶轮旋转做功,畸变气流在提升动能的同时方向发生偏转,受风机后级叶轮结构的影响,气流在流经静止的后级叶轮时受到后级叶轮的阻碍作用,最终偏转角度得不到修正。因此,后级叶轮出口的气流并非沿轴向流出,而是沿轴向呈现强烈的旋转运动状态。畸变气流在风筒末端中心位置处流速高于后级叶轮下游区域,经过扩散器作用后截面出流速度相对稳定。

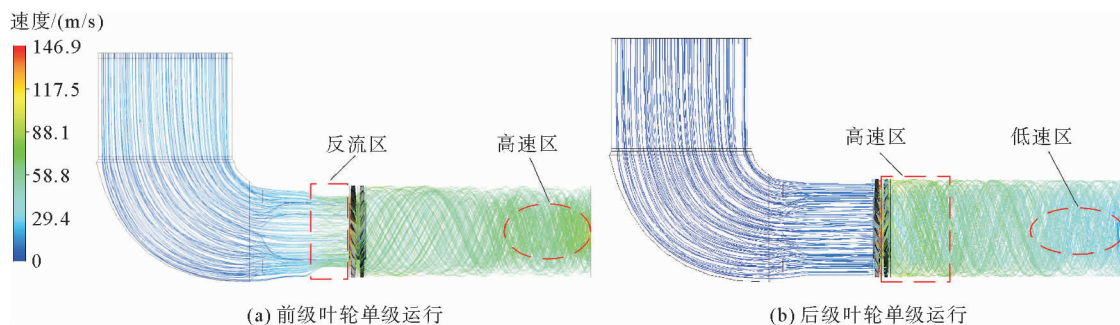


图 3 两级叶轮单级运行流场流线

Fig. 3 Single-stage operation flow field streamline of the two-stage impellers

后级叶轮单级运行时,流线在整个集流器内发展较为稳定。由于前级叶轮充当前导叶,导致原本较稳定的气流在流经前级叶轮后其均匀性遭到破坏,两级叶轮间流场严重恶化,受畸变扰动的区域和数值均大于前

级叶轮单级运行状况,经后级叶轮做功后气流流动更加混乱,不再沿轴线方向。在后级叶轮出口靠近外壁面处出现周向高速区,该流动状态对对旋风机轴向流场的发展影响较大,导致风机在后级叶轮出口及整个扩散器域内流速出现较大程度的衰减。随着流动损失的增大,后级叶轮出口近外壁面的周向旋转运动沿 Z 轴负方向不断减缓,流速降低。由图 4 可见,气流经过扩散器后在风筒末端中心位置处流速较低,截面出流速度均匀性被破坏,风机流动损失大,运行效率低。

综上,前级叶轮单级运行时集流器内流动损失小,叶轮出口的轴向速度稳定,并且由于后级叶轮的导流作用出口略有增速,扩散器内流动较均匀,风机出口速度均匀性好。后级叶轮单级运行时,扩散器上游内壁面位置流线密集,流速较快。与后级叶轮单级运行相比,前级叶轮单级运行时风机流线分布较规则,其主流速度更接近沿轴向的直线运动,能够降低风机的流动损失。

2.2 进口流动特征分析

两种进气条件下两级叶轮单级运行时风机叶轮进口上游 2 倍弦长处轴向截面的湍动能分布情况如图 5 所示。对比图 5(a)、图 5(c)可知,前级叶轮单级运行时后级叶片充当后导叶,此时畸变对风机叶轮的进气影响较小,湍动能沿周向分布相对均匀,气流总体平顺地经消声器、90°矩形截面弯管、集流器进入风机叶轮部分。

对比图 5(b)、图 5(d)可知,畸变进气条件下后级叶轮单级运行时,风机叶轮进口处的湍动能周向分布严重不均匀,高湍动能区域较前级单级运行大大增加;集流器末端区域环形风道内、外壁面处的气流流动混乱,在环形风道内壁面上半部分贴近集流器区域出现湍动能最大值,靠近机壳位置也出现湍动能高峰区;低湍动能区域集中分布在环形通道底部,呈“月牙”状,进气均匀性严重恶化。这种现象形成的主要原因是进气片式消声器与 90°矩形截面弯管组成的复杂畸变装置改变了风机的进气方式,在流经弯管外壁面处产生流动分离,后级叶轮单级运行时,前级叶轮充当前导叶的进气方式严重扰乱了气流在集流器下游的正常流动。

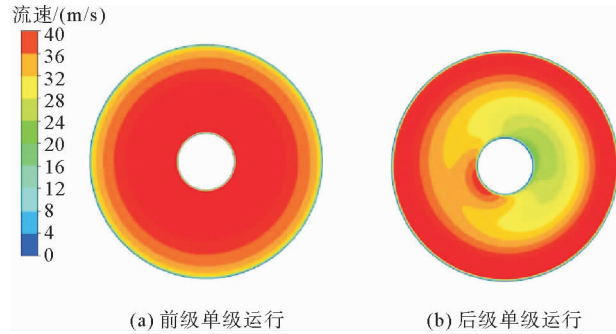


图 4 风筒末端位置出口速度分布

Fig. 4 Outlet speed distribution at the end of the blower

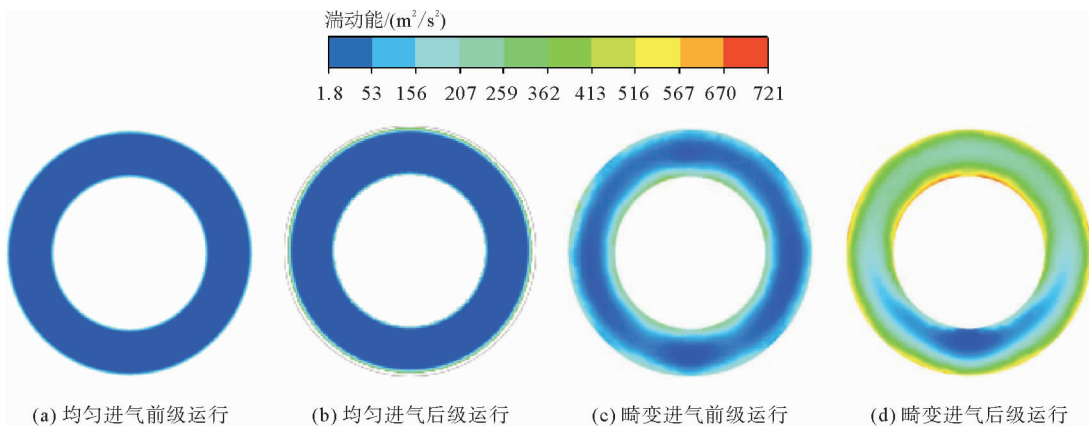


图 5 叶轮进口上游 2 倍弦长轴向截面湍动能分布

Fig. 5 Turbulent energy distribution in the axial section two times the chord length upstream of impeller inlet

2.3 叶片表面静压分析

畸变进气对后级叶轮单级运行时的进气扰动较大,故进一步对比两种进气条件下,后级叶轮单级运行时气流对后级叶片运行性能的影响。图 6 为后级叶轮单级运行时后级叶片吸力面和压力面压力分布。由图 6 可见,两种进气条件下,后级叶片吸力面均出现沿叶周方向的压力梯度,低压区均出现在叶片吸力面前缘(吸力面转动方向为顺时针,压力面转动为逆时针)靠近叶顶和叶根处^[13],叶根前缘位置受畸变进气影响较大,

出现较大面积的低压区。相较于畸变进气条件,均匀进气压力分布沿周向均匀性好,压力梯度较小,叶根位置没有明显的低压区,流动状态较好,可以降低气流的径向速度,有利于风机的正常运行,提高风机效率。

图 6(c)、图 6(d)所示的后级叶轮单级运行时后级叶片压力面的径向压力梯度更大,静压分布十分不均匀,叶片出现了明显的高压区和低压区,较大程度地增大了气流的径向速度。叶根与叶顶位置处高压区和低压区的面积均大于均匀进气条件,这是由于受畸变进气的影响,气流在这些位置产生了较大程度的流动分离。导致风机压强大幅度波动,严重影响风机的运行性能。

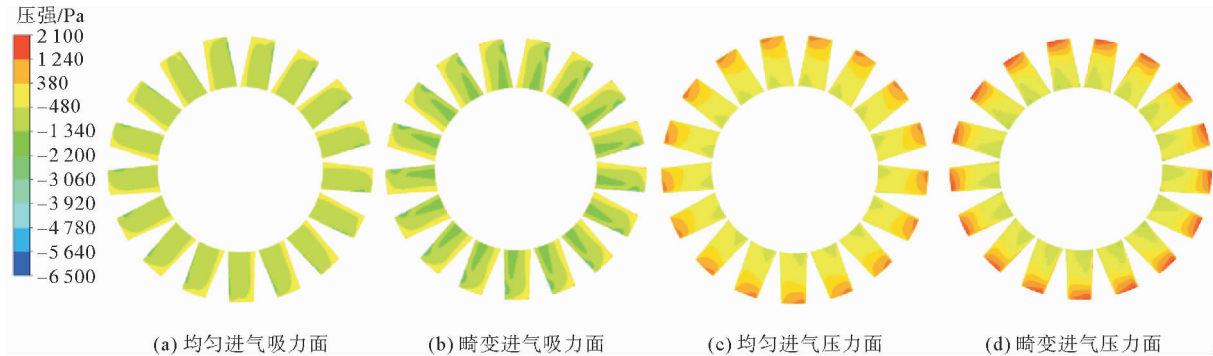


图 6 后级叶轮单级运行时后级叶片吸力面和压力面压力分布

Fig. 6 Pressure distribution on the suction surface and pressure surface of the rear stage blades

图 7 为两种进气条件下后级叶轮位于畸变中心区域的叶片表面静压分布。由图 7 可以看出,在叶高 10% 处,吸力面静压曲线从 50% 到 80% 的轴向弦长区域有明显的上升趋势,该区域压力面和吸力面的压差减小,甚至低于叶片尾缘附近的压差,说明该区域在 10% 叶高的整个轴向弦长区域的静压载荷最低,做功能力最弱。这是由轮毂角区的闭式分离向上抬起的过程中,卷吸周围气流形成的旋涡结构引起的。畸变进气时,在叶高 10% 处,叶片吸力面静压上升的起始位置与均匀进气相比明显提前,但轴向范围上升相对减小,叶片中部到尾缘区域做功能力减弱,是由于尾缘处较大逆压梯度所致。在叶高 90% 处,叶片压力面的静压分布趋势与其他叶高处不同,呈现出中部区域的静压较高、前缘及尾缘区域静压较低的特征。这是由于畸变引起叶片前缘区域的流动分离较大,叶片尾缘的低压区已延伸到叶顶区域,使前缘和尾缘区域的静压都有不同程度的降低,导致叶片前缘和尾缘附近的做功能力均有一定程度的减弱,而叶片中部附近的做功能力有所增强。

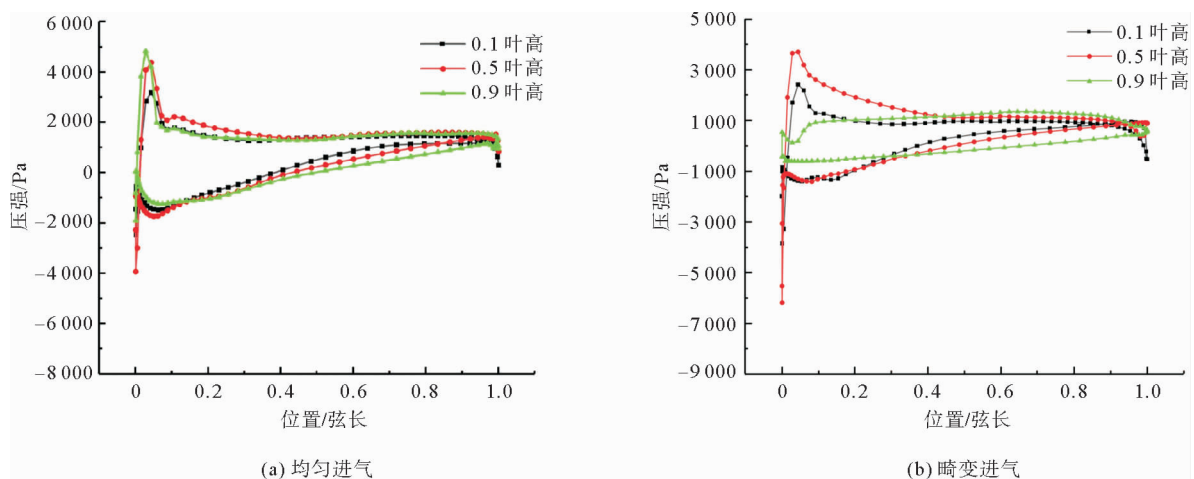


图 7 后级叶轮叶片表面静压分布

Fig. 7 Static pressure distribution on the blade surface of the rear impellers

2.4 叶轮区域流动分析

图 8 为两种进气条件下,前级叶轮单级运行时叶轮附近区域环面熵值分布。风机两级叶轮单级运行时,

熵值分布均呈现先增大后减小的趋势,前级叶轮上游区域熵值较高,且沿着 Z 轴负方向逐渐增大,在前级叶轮吸力面与叶片通道区域达到峰值,经过后级叶片的导流作用,后级叶轮及叶轮出口区域受畸变气流影响微弱,熵值较低,流动状态良好,最终在扩散器域内趋于稳定。

由图 8(a)可以看到,当前级叶轮旋转做功时,造成叶轮上游出现沿周向分布的高熵区域,由前级叶轮前缘延伸至上游 1.5 倍弦长附近,前级叶轮吸力面熵值明显高于压力面。这是由于两级叶轮叶片数不同,使后级叶轮充当后导叶,对气流的阻碍作用更明显。图 8(b)所示的畸变进气条件下熵值沿轴向变化趋势与图 8(a)大致相似,但叶轮上游受扰动产生的高熵区数值明显增大。这是由于畸变进气加剧了从前级叶片吸力面所产生通道反流(图 9)的程度,导致叶轮上游集流器域内流动受阻,高熵区域由前级叶轮前缘延伸至叶轮区域上游 2 倍弦长附近,严重影响了流场稳定发展。

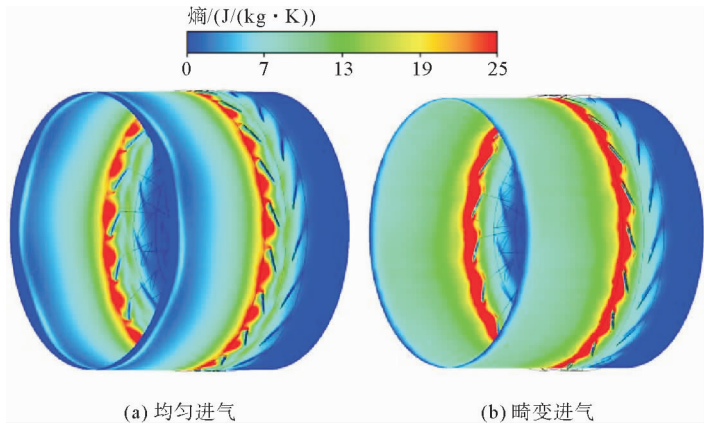


图 8 前级叶轮单级运行叶轮区域熵分布

Fig. 8 Entropy distribution in front-stage impeller operation

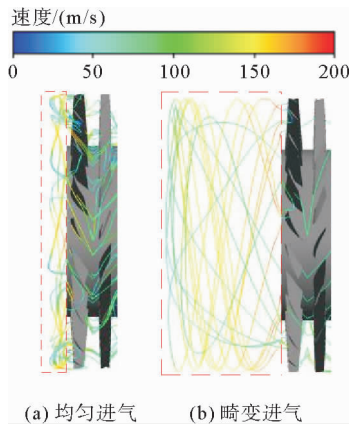


图 9 叶轮上游通道反流

Fig. 9 Impeller upstream passage backflow

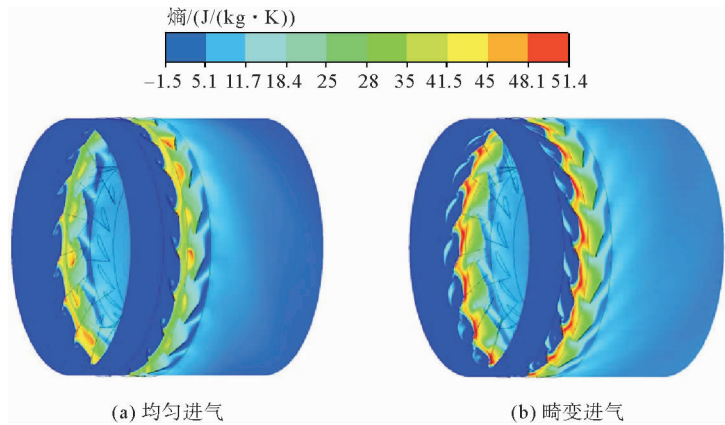


图 10 后级叶轮单级运行叶轮区域熵分布

Fig. 10 Entropy distribution in rear-stage impeller operation

图 10 为两种进气条件下,后级叶轮单级运行时叶轮附近区域环面熵值分布。由图 10 可见,畸变进气对后级叶轮单级运行时集流器域内流动影响较小,这是由于受前级叶轮充当前导叶时的导流作用影响,前级叶片上游通道反流现象得到改善。但两级叶轮间流道均出现高熵区,且后级叶片吸力面附近熵值减小,说明此时叶轮域内的涡团扰动严重破坏了两级叶轮间的流场均匀性。而后级叶轮出口流场相对稳定,熵值分布仅在叶轮下游出现范围更大的扰动,延伸至叶轮区域下游 3 倍弦长附近。这是由于后级叶轮单级运行时,畸变气流同时受到后级叶轮的旋转运动和前导叶的阻流作用,加上后级叶轮区域自身存在较大的逆压梯度,导致扩散器内流动已不能很好地沿轴向发展。此时流动状态对风机流场的轴向发展影响较大,周向旋转运动充满整个扩散器流域,最终导致风机出口气流不稳定。

对比前后叶轮单级运行方式可知,当后级叶轮单级运行时,叶轮附近区域周向环面熵分布与图 8 所示的前级叶轮单级运行时区别较大,此时集流器区域内轴向流场分布相对稳定。这是因为在叶轮上游区域中,扰动影响较大的是在前级叶片吸力面位置所产生的通道反流现象,而后级叶轮单级运行时,前级叶轮固定充当前导叶对气流起阻滞作用,通道反流程度被大幅抑制。高熵区集中在两级叶轮间,在前级叶轮压力面附近出现最大值,并且两级叶轮个别流道出现高熵区,存在较大程度的流动分离现象。气流经过后级叶轮做功后,

扰动区域从后级叶片压力面延伸至下游 2 倍弦长附近,扩散器内流动的均匀性被破坏。

2.5 性能分析

由上述分析可知,进气畸变严重影响对旋风机叶轮的工作状态,进而引起风机的性能劣化。图 11 为设计转速下对旋风机在均匀进气和畸变进气条件下的运行特性曲线。从图 11 可以看出,畸变进气条件下对旋风机在各流量工况的全压和效率均低于均匀进气条件,相较于均匀进气,畸变进气条件下前级和后级单级运行情况的全压分别降低 7.92% 和 14.18%,效率均降低约 5%。

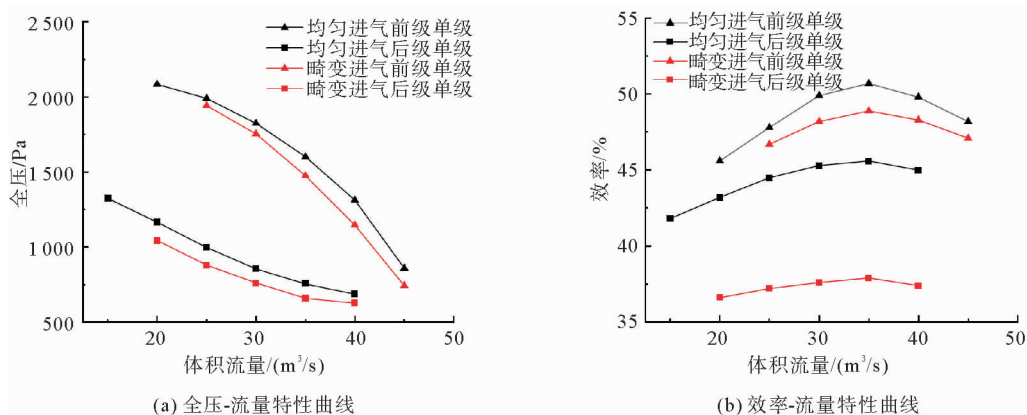


图 11 均匀与周向畸变进气条件下对旋风机运行特性曲线

Fig. 11 Performance curves of contra-rotating fan under uniform and distortion inlet conditions

在大流量工况下,畸变区内总压较低,气流流速缓慢,畸变进气对前级叶轮单级运行时全压和效率的影响起主导作用,与均匀进气条件相比,对旋风机的全压和效率下降明显;随着出口流量的减小,叶片通道堵塞,畸变进气对后级叶轮单级运行时全压和效率的影响相对增强,两种进气条件下全压和效率的差异逐渐增大,流动损失加剧。畸变进气条件下,对旋风机的失稳边界向流量较大值处移动,稳定工作裕度显著减小。

表 1 是两种进气条件下,前、后两级叶轮单级运行时风机的峰值效率及对应的全压值。由表 1 可知,在两种进气条件下,前级叶轮单级运行与后级叶轮单级运行相比,风机的全压均提高约 720 Pa;风机全压效率的变化受进气条件影响相对较大,均匀进气条件下前级叶轮单级运行较后级单级运行提高 5%,畸变进气条件下提高 11%。

与畸变进气条件相比,均匀进气条件下风机前、后叶轮单级运行方案的全压均提高约 125 Pa,其效率变化受前、后级单独运行的影响较大。当风机前级叶轮单级运行时,均匀进气较畸变进气条件全压效率提高 2%,后级叶轮单级运行时提高 7.7%。说明在风机的进口段安装消声器与 90°矩形截面弯管组合装置后,产生的畸变进气显著降低了风机后级单级运行性能。

表 1 单级运行时风机的全压和全压效率

Table 1 Full pressure and full pressure efficiency of the fan in single-stage operation

参数	均匀进气		畸变进气	
	前级	后级	前级	后级
全压/Pa	1 602	880	1 475	755.2
全压效率/%	50.7	45.6	48.9	37.9

3 结论

对压入式矿用对旋风机均匀与畸变两种进气条件下,两级叶轮单级运行时的内部流场进行数值模拟,分析了畸变进气对风机单级运行时的内流特性及风机性能的影响,主要结论如下。

1) 两种进气条件下,前级叶轮单级运行时内流特性和整体性能均优于后级叶轮单级运行,均匀进气条件下的风机性能优于畸变进气条件。进气条件和单级运行方案对全压的影响较小,对全压效率的影响较大。

2) 畸变进气对前、后级叶轮单级运行时所影响的流动区域不同。前级叶轮单级运行时影响区域为集流器末端至前级叶轮段,后级单级运行时影响区域在前级叶轮出口至扩散器上游。同时,畸变进气加剧了

前级叶轮单级运行时叶轮上游的通道反流程度与后级叶轮单级运行时两级叶轮间损失,严重破坏了该区域流场的均匀性。

3) 畸变进气对后级叶轮单级运行的影响更为显著,进口段流场湍动能分布与出口段截面出流速度呈现明显的不均匀性。与均匀进气相比,后级叶片沿径向的压力梯度显著增大,后级叶片前缘及尾缘位置的做功能力有一定程度减弱;与前级叶轮单级运行相比,扩散器内流动损失增大,风机的全压、全压效率均明显降低。

参考文献:

- [1] JIANG C L, LI M J, LI E, et al. Investigation on unsteady flow characteristics in an axial-flow fan under stall conditions [J/OL]. *Processes*, 2020, 8(8). DOI: 10.3390/pr8080958.
- [2] 李胜. 矿用对旋风机两级叶轮转速匹配性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
LI Sheng. Research on two-stage impellers rotational speed matching for counter-rotating mine fan performance [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [3] 王军, 肖朋. 变工况下对旋风机的数值模拟实验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(9): 81-84.
WANG Jun, XIAO Peng. Numerical simulation of a counter-rotating axial flow fan in design or off-design conditions [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(9): 81-84.
- [4] MANAS M P, KARMAKAR A, PRADEEP A M. Windmilling characteristics of a contra-rotating fan [J/OL]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(8). DOI: 10.1115/1.4049265.
- [5] 赵梓岑, 付云鹏, 孙鹏. 非轴对称静叶对畸变条件下压气机流场影响的数值研究[J]. *大连海事大学学报*, 2018, 44(2): 67-73.
ZHAO Zicen, FU Yunpeng, SUN Peng. Numerical investigation on the influence of non-axisymmetric stators on compressor flow field with distorted inlet [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2018, 44(2): 67-73.
- [6] 张皓光, 楚武利, 吴艳辉, 等. 进口总压畸变对压气机性能及流场影响的机理研究[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(7): 880-885.
ZHANG Haoguang, CHU Wuli, WU Yanhui, et al. A study of the mechanism of the influence of inlet total pressure distortion on compressor performance and its flow field [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(7): 880-885.
- [7] 朱勉顺, 刘慧敏, 安华成. 对旋风机不同转速比下的数值模拟分析[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(11): 80-81.
ZHU Mianshun, LIU Huimin, AN Huacheng. Numerical simulation analysis of counter-rotating fan at different speed ratios [J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(11): 80-81.
- [8] SHAHRIYARI M J, KHALEGHI H, HEINRICH M. A model for stall and surge in low-speed contra-rotating fans [J/OL]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, 141(8). DOI: 10.1115/1.4043251.
- [9] 李昊. 矿用对旋风机运行前期性能优化及小流量工况流场研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI Hao. Research on performance optimization and flow field in small flow of contra-rotating fan in the early stage of operation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [10] LI J, DONG X, SUN D K, et al. Response and stabilization of a two-stage axial flow compressor restricted by rotating inlet distortion [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(9): 72-82.
- [11] ZHANG L, ZHANG L, ZHANG Q, et al. Effects of the second-stage of rotor with single abnormal blade angle on rotating stall of a two-stage variable pitch axial fan [J/OL]. *Energies*, 2018, 11(12). DOI: 10.3390/en1123293.
- [12] 陈庆光, 聂鹏, 徐聪聪. 矿用对旋风机单级运行时内流特性及性能分析[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(12): 66-68.
CHEN Qingguang, NIE Peng, XU Congcong. Analysis of internal flow characteristics and performance of mine counter-rotating wind fan in single-stage operation [J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(12): 66-68.
- [13] 陈庆光, 房菲, 张振东, 等. 对旋风机叶轮内部流场的压力脉动分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(2): 80-85.
CHEN Qingguang, FANG Fei, ZHANG Zhendong, et al. Analysis on pressure fluctuation of the interior flow field in impellers of a contra-rotating axial fan [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2011, 30(2): 80-85.

(责任编辑: 齐敏华)