

文章编号:1000-8055(2013)04-0885-08

级环境下附面层抽吸对对转压气机性能的影响

刘 波, 曹志远, 魏 巍, 史 磊
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为研究级环境下附面层抽吸(BLS)对对转压气机性能影响的机理, 针对某双排轴流对转压气机转子进行附面层抽吸的探索. 在前排转子 R1(Rotor 1)、后排转子 R2(Rotor 2)吸力面沿弦向不同位置分别开设 3 个不同抽吸槽, 研究了不同吸气位置与吸气量下 R1 单独吸气、R2 单独吸气对对转压气机流场结构及性能的影响. 结果表明: R1 单独吸气时, 随吸气量增加, R1 效率提高, R2 效率降低, 对转压气机整机效率先增大后减小, 最佳吸气位置靠近 R1 尾缘; R2 单独吸气时, 随吸气量增加, R1 效率基本不变, R2 效率先增大后减小, 对转压气机整机效率先增大后减小, 最佳吸气位置靠近 R2 尾缘; 附面层抽吸后落后角明显减小, 叶排间的气流参数匹配是级环境下附面层抽吸需要考虑的重要因素.

关 键 词: 吸附式压气机; 附面层抽吸; 压气机; 对转; 二次流

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effects of boundary layer suction on counter-rotating compressor in multistage environment

LIU Bo, CAO Zhi-yuan, WEI Wei, SHI Lei

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the effects of boundary layer suction (BLS) on counter-rotating compressors in multistage environment, numerical investigations were performed on the rotors of a dual stage counter-rotating compressor with BLS method. Three different suction slots in chord direction were set up on the front rotor (R1) and rear rotor (R2) suction surface to study the effects of flow structure and performance on different suction ways, and independent suction were carried out on R1 and R2 respectively at different suction locations and suction air rate in counter-rotating compressor. By BLS of individual R1, the efficiency increases with the rise of suction air rate. But the aerodynamic performance matching R1 with R2 becomes worse and makes R2 fall directly. The overall efficiency is also represented by the fluctuation from going up to down. The best suction location of R1 is near the trailing edge. By BLS of R2 individually, the efficiency of R2 keeps the trend from increase to reduction with the rise of suction rate, while the efficiency and flow field of R1 remain unchanged nearly. The best suction location of R2 is near the trailing edge. The deviation angles reduce obviously after the BLS. The above results demonstrate that matching of aerodynamic parameters between blades rows is a main factor to be considered after BLS in multistage environment.

收稿日期: 2012-05-08

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.885_024.html

基金项目: 国家自然科学基金(50976093)

作者简介: 刘波(1960—), 男, 陕西西安人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事先进叶轮机械气动设计、试验研究.

Key words: aspirated compressor; boundary layer suction; compressor; counter-rotating; secondary flow

现代航空技术的发展趋势要求压气机级压比进一步提高,级负荷的提高导致叶片吸力面附面层逆压梯度增加,附面层内低能流体在强逆压梯度的作用下易于分离,严重影响压气机的性能。采用附面层抽吸技术主动抑制或消除附面层分离这一思想,自 1997 年 Kerrebrock 教授等^[1]首次提出后,叶轮机械研究人员针对吸附式压气机进行了大量的研究工作^[2-4]。Merchant^[5]采用准三维计算程序 Mises 分析了附面层抽吸对叶轮机气动设计与叶型性能的影响,发现叶轮机进口流量 0.5%~1.0% 的抽吸流量即可在大部分叶展实现高负荷。Kerrebrock 等^[6]设计并实验测试了双级对转吸附式风扇,2 级转子叶尖速度分别为 441.96,350.52 m/s,通过第 2 级转子抽吸,使得该压气机压比达到 3,绝热效率达 87%。

文献^[7]对风扇转子吸力面、压力面进行抽气,发现附面层抽吸能够改善激波结构,适当的附面层抽吸可避免激波附面层分离、消除复杂旋涡,改善风扇性能。南向谊等^[8]针对某超声速压气机叶片高负荷工况,数值研究了吸力面不同位置、不同抽吸量对气动性能的影响,研究表明抽吸位置和抽吸流量对抽吸效果有重要影响,最佳抽吸位置在分离区下游。宋彦萍等^[9]数值研究了附面层抽吸对掠叶栅性能的影响,发现附面层抽吸可改变叶栅静压分布,静压的重新分布可有效降低分离损失,提高叶栅静压比及叶片负荷。王掩刚等^[10]采用数值模拟方法探索了叶栅端壁不同抽吸位置对角区流动及通道涡等的影响规律,发现在叶栅通道激波后 25% 弦长进行端壁抽吸可在对上游流场不产生较大影响下降低流动损失;在跨声速叶栅叶表进行附面层抽吸实验^[11]发现,在激波前进行抽吸会恶化叶栅性能,波后进行抽吸可明显改善叶栅性能,并对跨声速压气机转子叶表和端壁抽吸进行对比^[12],叶片吸力面抽吸主要影响区域是叶片表面与通道处流场,端壁吸气主要影响端壁区域流场。郭爽等^[13]实验研究了端壁和吸力面同时进行附面层吸除对大转角叶栅性能的影响,优化了叶栅整体流场,效果优于单独叶片吸力面抽吸及端壁抽吸。兰发祥、葛正威^[14-15]针对吸附式压气机设计技术展开研究,为吸附式压气机设计提供依据。

现有吸附式压气机的研究多集中于叶栅及单

排叶片中,级环境下附面层抽吸的研究较少,附面层抽吸在对转压气机级环境中的应用更为少见,其影响机理尚不清楚。本文基于某轴流对转式压气机实验台,在级环境下分别对转子 1、转子 2 进行附面层抽吸,旨在研究级环境下附面层抽吸对对转压气机性能影响机理,为吸附式对转压气机设计提供参考。

1 研究对象及数值模拟方法

本文研究对象由进口导流叶片(IGV)、转子 1(R1)、转子 2(R2)、以及出口导流叶片(OGV)组成,实验台实物如图 1 所示。其中 IGV 为直叶片,IGV 出口气流方向沿轴向。为提高数值模拟效率,在不影响数值模型和物理模型的一致性基础上,数值研究去除了 IGV 与 OGV,仅考虑双排转子叶片。

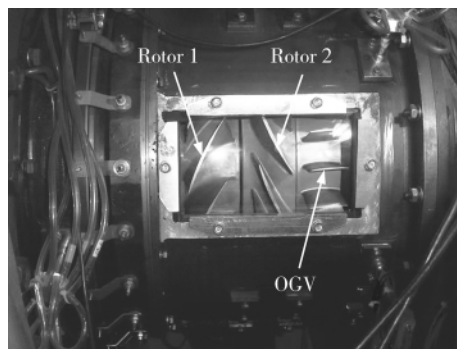


图 1 对转压气机实物图

Fig. 1 Counter-rotating compressor

对转压气机叶片通道网格采用 NUMECA 软件包中的 AUTOGRID 模块自动生成 O4H 网格拓扑结构;抽吸缝网格采用 IGG 模块生成 H 型网格,并通过非匹配连接技术对抽吸缝网格及对转压气机通道网格进行连接,网格总数约 65 万,对转压气机叶片与轮毂表面计算网格如图 2 所示。数值计算过程采用 Fine/Turbo 软件包,应用 Jameson 有限体积差分格式并结合 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,空间离散采用 2 阶精度的中心差分格式,时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 方法迭代求解, Courant-Friedrichs-Lowy (CFL) 数取 3.0,同时采用隐式残差光滑方法以及多重网格技术以加速收敛过程。两转子

交接面处理方法采用混合面法. 边界条件给定进口绝对总温、绝对总压和气流角, 出口给定背压.

抽吸缝出口给定抽吸流量, 图中 LE 表示前缘, TE 表示尾缘.

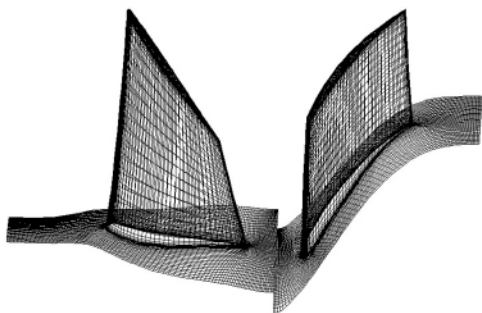


图2 对转压气机计算网格

Fig. 2 Computational mesh for counter-rotating compressor

2 流场分析及抽吸方案确定

设计转速数值模拟发现, 近失速点对转压气机 R1, R2 吸力面自叶根中部至叶尖尾缘的三角形区域内存在大面积低速区, 径向二次流明显, 这是造成对转压气机气流损失、效率降低的重要因素之一, R1, R2 吸力面近壁面极限流线如图 3 所示.

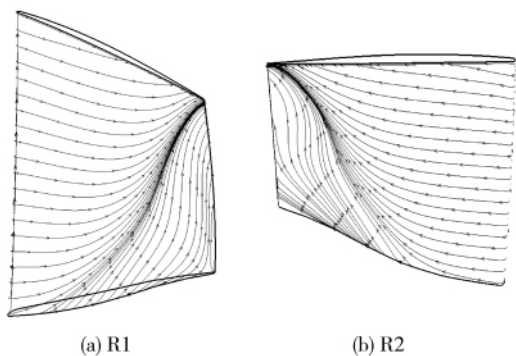


图3 转子吸力面近壁面极限流线图

Fig. 3 Suction surface limited streamline for rotors

为探索级环境下附面层抽吸对对转压气机性能的影响, 分别在 R1, R2 吸力面附面层分离区域附近 3 个不同弦长位置开设抽吸缝, R1 吸力面 3 种抽吸缝方案位置分别为 55%, 71%, 90% 弦长处, 0%~75% 叶展; R2 吸力面 3 种抽吸缝, 3 种抽吸缝方案位置分别为 45%, 57%, 74% 弦长处, 0%~98% 叶展, 文中抽吸孔未进一步向叶片尾缘开设. R1 吸力面抽吸缝结构与 R2 吸力面抽吸缝结构如图 4 所示. 针对 R1 吸力面单独吸气和 R2 吸力面单独吸气, 并研究多种不同吸气量下对转压气机性能及流场结构变化. 数值模拟时, 附面层

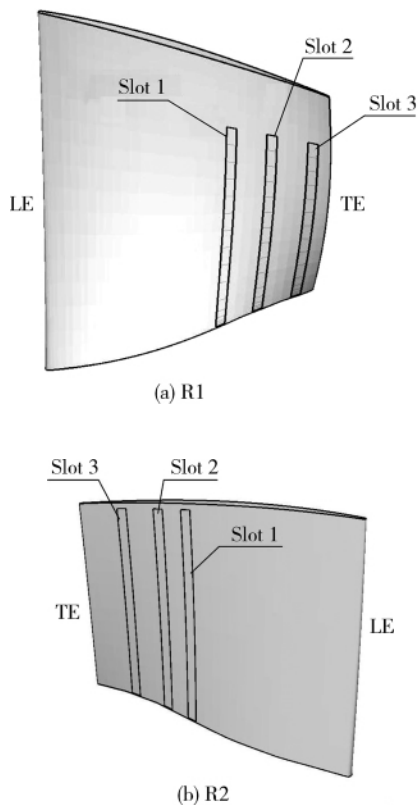


图4 对转压气机转子吸力面抽吸缝

Fig. 4 Suction slots of compressor rotors

3 计算结果及分析

3.1 R1 单独吸气

3.1.1 不同抽吸位置与抽吸量对效率的影响

图 5~图 7 分别给出了 R1 吸力面不同抽吸缝位置抽吸时 R1 效率、R2 效率、整机效率随抽吸系数变化曲线. 其中, 抽吸系数 (SC 量符号记为 C_s) 定义为抽吸量与未抽吸时对转压气机流量之比. 未抽吸时对转压气机 R1 效率、R2 效率、整机效率依次为 92.8%, 84.6%, 87.8%, 即各图中虚线所示. 由图可知, 在 R1 吸力面不同弦长位置处吸气均能提高 R1 效率, 抽吸系数较小时 R1 效率提高不明显, 随抽吸系数增加 R1 效率均明显提高, 但不同抽气位置和抽气量效率提高程度不一, 相同抽吸系数下在 Slot 3 位置处进行抽吸效率提高最大, R1 效率最多提高 2.6%, Slot 1 位置处抽吸时 R1 效率提高最小. 抽吸系数较小时, R1 吸力面抽吸对 R2 效率影响不大, 随抽吸系数增加, 不同位置抽吸均使 R2 效率下降, 在 Slot 1 位置

处抽吸时 R2 效率下降最明显,最多降低 2.5%, Slot 3 位置处抽吸时 R2 效率降低最小。

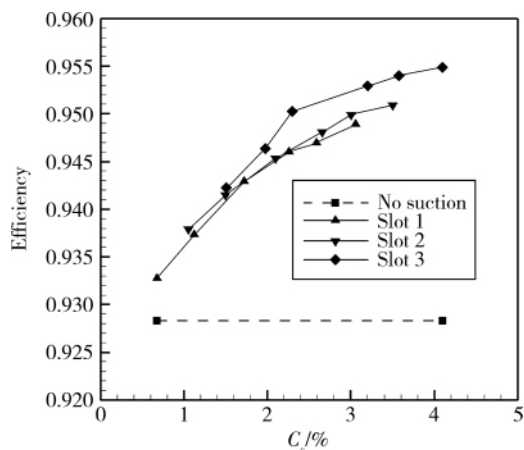


图 5 R1 效率随抽吸系数变化

Fig. 5 R1 efficiency of different C_s

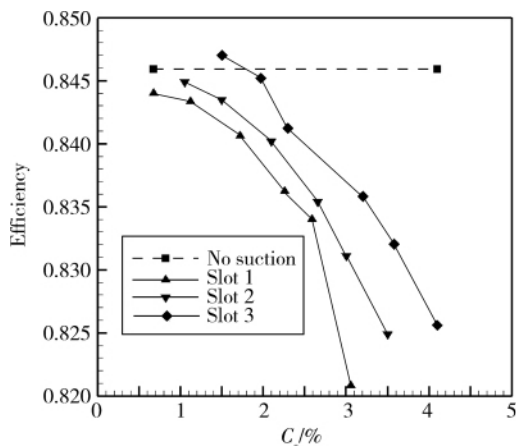


图 6 R2 效率随抽吸系数变化

Fig. 6 R2 efficiency of different C_s

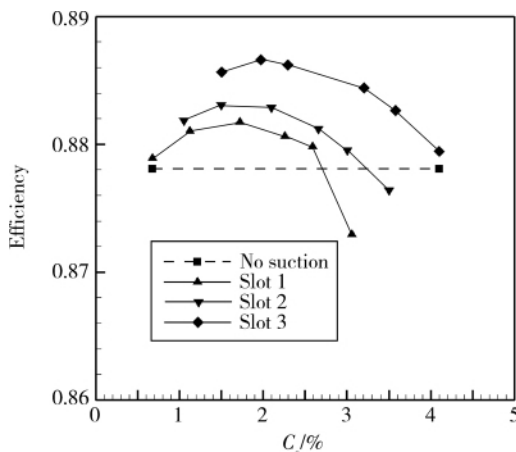


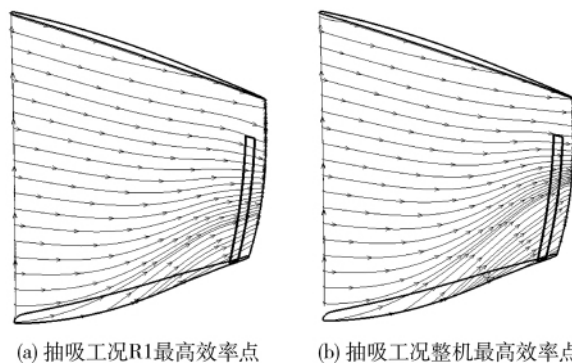
图 7 整机效率随抽吸系数变化

Fig. 7 Counter-rotating compressor efficiency of different C_s

在 R1 效率和 R2 效率变化趋势的共同作用下,随 R1 吸力面抽吸系数增加,对转压气机整机效率先增大后减小,抽吸量具有一个最优值,Slot 3 位置处抽吸时效率增加最多,最多提高 0.9%。但对于 R1 单排叶片,并未得到文献[8]所述的抽吸量有一个最优值,其原因可能是由于本文计算中随抽吸量增加,R2 效率降低较多导致计算发散,从而不能继续提高抽吸量,并未算至最优值所致。

3.1.2 叶片表面流动分析

图 3(a)给出了未抽吸时 R1 吸力面极限流线图。由图可知,原对转压气机 R1 吸力面存在大范围的低速高熵区域,径向流动明显,其范围分布于从叶根中部至叶尖尾缘,约占吸力面面积的 1/3,该流动情况必然造成较大的气流损失。图 8(a)、图 8(b) 分别给出了抽吸工况 R1 最高效率点、整机最高效率点 R1 吸力面极限流线图,相比图 3(a),抽吸后吸力面流动得到明显改善。R1 最高效率点时,R1 吸力面径向流动基本消除,气流从叶片前缘均匀的流向尾缘,仅在叶根附近存在小区域的径向流动;对转压气机整机最高效率点处,R1 吸力面径向流动也明显减小,但流场改善不如 R1 最高效率点明显。



(a) 抽吸工况 R1 最高效率点 (b) 抽吸工况整机最高效率点

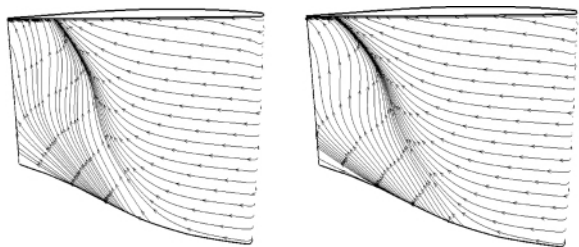
图 8 R1 吸力面极限流线图

Fig. 8 Suction surface limited streamline for R1

综合图 3(a)、图 8 中各图,R1 吸力面抽吸可有效的抑制叶片吸力面的径向二次流,使流场更趋合理,减小流动损失。但在级环境下,排间流场相互影响,对转压气机 R1 最高效率点时整机效率并非最高。

图 3(b)给出了未抽吸时 R2 吸力面极限流线图。原对转压气机 R1 吸力面存在较大范围的低速区域,径向流动明显,其范围分布于从叶根中部至叶尖尾缘,约占吸力面面积的 1/4。图 9(a)、图 9(b) 分别给出了抽吸工况 R2 最高效率点、整

机最高效率点 R2 吸力面极限流线图. R1 吸力面抽吸后, R2 吸力面径向二次流区域范围增加, 尤以 R1 最高效率点增加最为明显. 这势必增大 R2 气流损失, 降低 R2 效率, 影响对转压气机整机性能的提高.



(a) 抽吸工况 R2 最高效率点 (b) 抽吸工况整机最高效率点

图 9 R2 吸力面极限流线图

Fig. 9 Suction surface limited streamline for R2

综合图 8、图 9, R1 吸力面抽吸后, R1 吸力面流动改善明显, 明显降低气流损失, 但 R2 吸力面径向二次流区域增加, 增加气流损失. 级环境下, 对于抽吸叶片 R1, 对转压气机附面层抽吸可明显提高 R1 效率降低损失, 但下游叶排由于其进口参数改变, 损失可能升高, 并因此影响对转压气机整机效率的提升.

3.1.3 抽吸对 R1 中径处流场及气流角影响

图 10 给出了未抽吸/抽吸工况 R1 叶展中部相对马赫数等值线分布对比图. 由图可知, 未抽吸时 R1 吸力面附面层逐渐增厚, 吸、压力面在叶片尾缘汇合后形成较宽的尾迹区, 附面层内的摩擦损失与尾迹区与主流区的掺混是对转压气机气动损失的主要来源之一. 附面层抽吸后明显减小了叶片吸力面附面层厚度, 尾迹区宽度明显减小, 这

是 R1 气流损失减小及压气机效率提高的有力证明; 尾迹中心位置向叶片压力面移动, 表明气流落后角减小, 附面层抽吸后 R1 负荷提高, 做功及扩压能力明显提高. 从叶展中部静压分布图可明显看出, R1 叶片中部附面层抽吸后静压分布有明显改善, 整个叶片负荷明显提升, 表明附面层抽吸后叶片做功能力提高, 其中以 R1 最高效率时负荷提高最为明显.

图 11 与图 12 分别给出了 R1 出口及 R2 进口相对气流角沿径向分布. 由图可明显看出, R1 吸力面附面层抽吸后 R1 后相对气流角明显减小, 以 R1 最高效率点减小最多, 进一步证明气流落后角减小, 扩压能力提高, 从图 13 可明显看出, 抽吸后 R1 吸、压力面静压差增大, 叶片负荷大幅提高. 但抽吸后 R2 进口相对气流角增大, 导致其攻角增大, 以 R1 最高效率点增大最多, 使 R2 工况向负荷增大方向移动, 导致已处于高负荷工况下的 R2 损失增大、效率降低. 级环境下附面层抽吸对后排叶片参数影响较大, 易使其负荷增大, 损失增大.

文中数值模拟采用混合平面法处理上下游转子交接面间数据传递, 假定交接面处流场参数沿周向均匀. 尽管抹平了尾迹等流场的周向不均匀性, 但综合图 5~图 10 及以上分析, 可验证本文 R1 出口气流角及 R2 进口气流角变化趋势的可信度.

3.2 R2 单独吸气

3.2.1 不同抽吸位置与抽吸量对效率的影响

图 14~图 16 分别给出了 R2 吸力面不同抽吸缝位置抽吸时 R1 效率、R2 效率、整机效率随

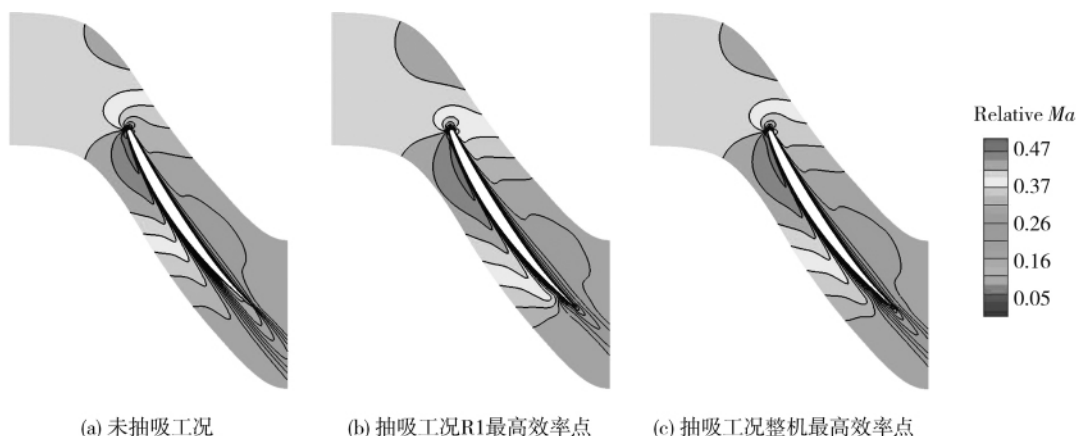


图 10 R1 中径处相对马赫数等值线图

Fig. 10 R1 mid-span corresponding to Mach number contour

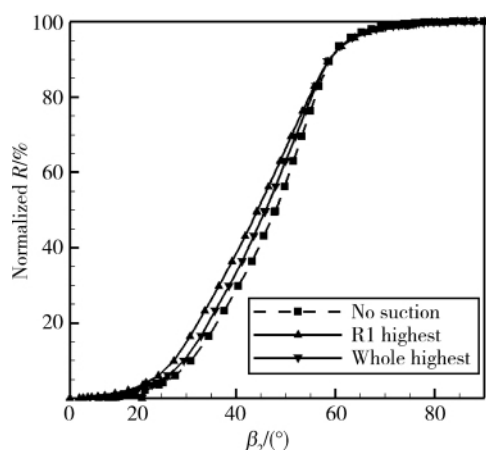


图 11 R1 出口相对气流角径向分布

Fig. 11 Relative flow angle of R1 outlet

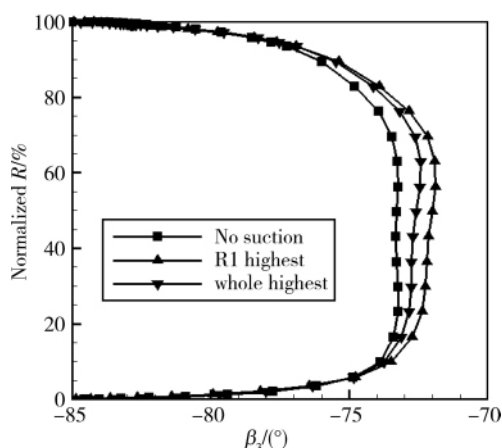


图 12 R2 进口相对气流角径向分布

Fig. 12 Relative flow angle of R2 inlet

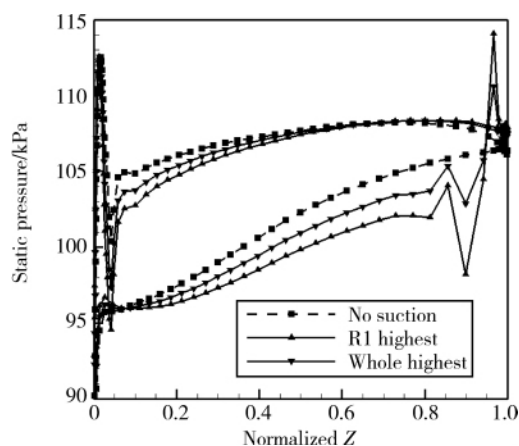


图 13 R1 中径处静压对比

Fig. 13 Static pressure for R1 mid-span

抽吸系数变化曲线. 未抽吸时对转压气机整机效率、R1 效率、R2 效率如图中虚线所示. 由图 14 可知, 在 R2 吸力面吸气对上游转子 R1 效率影响较小, R1 效率在原效率附近波动, 主要是 R2 抽吸

后对转压气机流量变化导致 R1 工况稍有变化而引起. 由图 15 可知, R2 吸力面不同位置处抽吸均能有效提高 R2 效率, 抽吸系数较小时 R2 效率提升较小, 随抽吸系数增加, R2 效率先增加后减小, 存在一个最优抽吸量, 呈现出与文献[8]相同的趋势. 相同抽吸系数下在尾缘 Slot 3 位置处进行抽吸时效率提高最多, 最多提高 2.5%, 靠近叶片前缘的 Slot 1 位置处抽吸时 R1 效率提高最小.

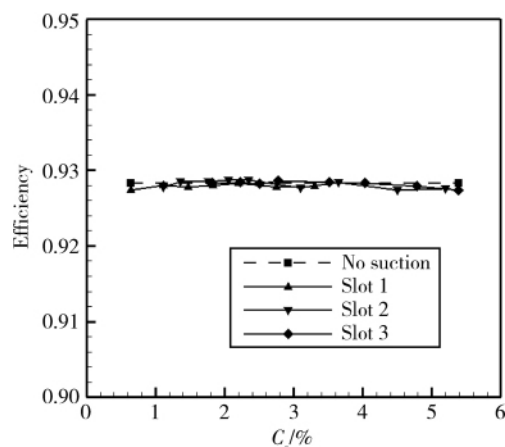


图 14 R1 效率随抽吸系数变化

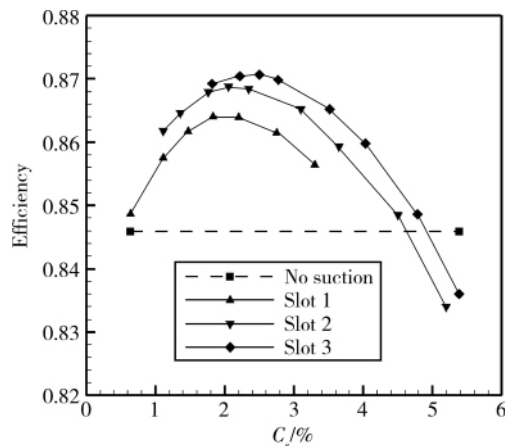
Fig. 14 R1 efficiency with different C_s 

图 15 R2 效率随抽吸系数变化

Fig. 15 R2 efficiency with different C_s

综合 R1 效率与 R2 效率变化趋势, 对转压气机整机效率与 R2 效率变化趋势相似 (如图 16 所示), 随 R2 吸力面抽吸系数增加, 对转压气机整机效率先增大后减小, 抽吸量具有一个最优值, Slot 3 位置处抽吸时效率增加最多, 最多提高 1.4%.

3.2.2 叶片表面流动分析

由于 R2 吸力面抽吸对 R1 影响较小, 抽吸工况 R2 最高效率点与对转压气机整机最高效率点

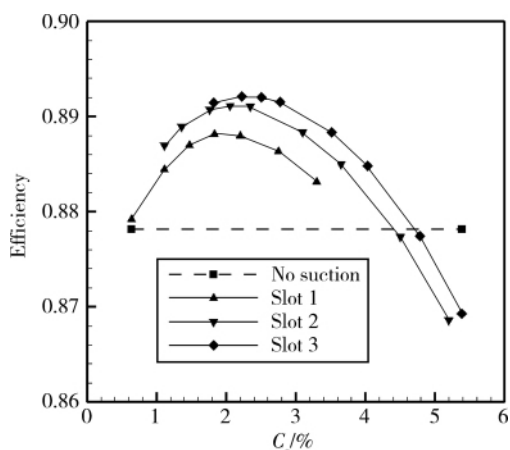


图16 整机效率随抽吸系数变化

Fig. 16 Whole compressor efficiency with different C_s

在图15、图16中非常接近,仅选取抽吸工况对转压气机整机效率最高点处进行分析。图17、图18分别给出了R2吸力面抽吸后R1吸力面与R2吸力面极限流线图。由图17可知,相比未抽吸时R1吸力面流线分布(图3),R2吸力面抽吸对R1影响较小,R1吸力面径向二次流区域稍有减小。由图18可知,附面层抽吸后,R2叶片吸力面径向二次流得到明显控制,流场更加合理,损失减小,气流较为平缓地从前缘流向尾缘,仅在尾缘根部尚存在径向二次流动。

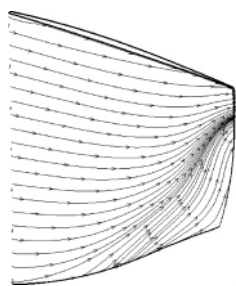


图17 抽吸工况 R1 吸力面极限流线

Fig. 17 Suction surface limited streamline for R1

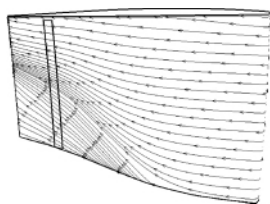
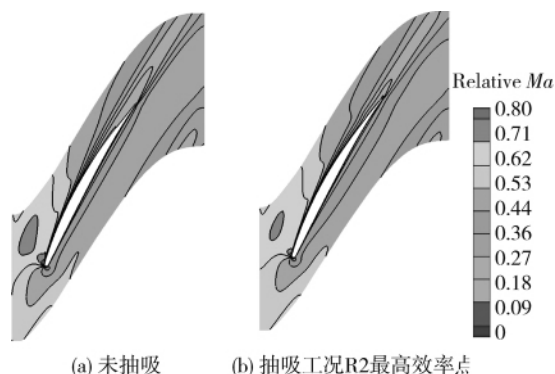


图18 抽吸工况 R2 吸力面极限流线

Fig. 18 Suction surface limited streamline for R2

3.2.3 抽吸对 R2 中径处流场影响

图19给出了未抽吸/抽吸工况R2叶展中部相对马赫数等值线分布对比图。由图可知,附面层抽吸明显减小了R2叶片吸力面附面层厚度,尾迹区宽度明显减小,该现象对减小R2气流损失、提高对转压气机效率有重要意义;R2尾迹中心位置向叶片压力面移动,表明气流落后角减小,附面层抽吸后R2负荷提高,做功及扩压能力明显提高。从图20可明显看出,R2叶片中部附面层抽吸后静压分布有明显改善,叶片前缘负荷减小,20%轴向弦长后负荷增加,相比未抽吸时叶片倾向于后加载,整个叶片负荷明显提升,表明附面层抽吸后叶片做功能力提高,对转压气机性能得以明显提升。



(a) 未抽吸 (b) 抽吸工况R2最高效率点

图19 R2 中径处相对马赫数等值线图

Fig. 19 R2 mid-span corresponding to Mach number contour

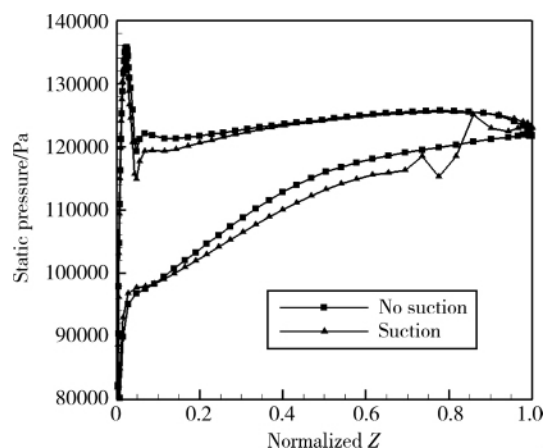


图20 R2 中径处静压对比图

Fig. 20 Static pressure for R2 mid-span

4 结 论

本文针对某双排轴流对转压气机转子进行级环境下附面层抽吸的探索。根据流场结构,在R1、R2吸力面沿弦向不同位置分别开设3个不同抽

吸槽,分别研究了不同吸气位置与吸气量下 R1 单独吸气、R2 单独吸气对对转压气机流场结构及性能的影响. 结论如下:

1) 级环境下 R1 单独吸气时,不同弦长位置处吸气均能提高 R1 效率,随抽吸量增加 R1 效率提高,相同抽吸量下 Slot 3 位置处吸气效率提高最大,最多提高 2.6%;R1 吸气后下游叶排 R2 进口气流参数与 R2 匹配性变差,导致 R2 效率降低;随吸气量增加,对转压气机整机效率先增加后减小,有一个最佳抽吸量,整机效率最多提高 0.9%.

2) 级环境下 R1 单独吸气明显改善 R1 流场分布,R1 吸力面低速高熵区大幅减小,吸力面附面层厚度降低,尾迹宽度明显减小,有效降低 R1 气流损失;吸气后叶片负荷提高,气流转折角增大;R2 流场分布较未抽吸时变差,阻碍对转压气机整机性能提升;级环境下附面层抽吸时,前排抽吸转子后气流参数与下游叶排间的匹配是影响压气机性能提高的重要因素.

3) 级环境下 R2 单独吸气时,随抽吸量增加,R2 效率先增大后减小,最多提高 2.5%,对转压气机整机效率先增大后减小,最高提高 1.4%;上游转子 R1 基本不受下游转子抽吸影响,效率基本不变.R2 附面层抽吸明显改善对转压气机流场,有效提高对转压气机性能.

参考文献:

- [1] Kerrebrock J L, Reijnen D P, Ziminsky W S, et al. Aspirated Compressors[R]. ASME Paper 97-GT-525, 1997.
- [2] WANG Songtao, QIANG Xiaoqing, LIN Weichun, et al. Highly-loaded low-reaction boundary layer suction axial flow compressor[R]. ASME Paper GT-2007-28191, 2007.
- [3] Francesca Satta, Marina Ubaldi, Pietro Zunino, et al. Wake control by boundary layer suction applied to a high-lift low-pressure turbine blade[R]. ASME Paper GT-2010-23475, 2010.
- [4] 刘波, 南向谊, 王掩刚, 等. 吸附式风扇/压气机技术的进展与展望[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 945-954.
LIU Bo, NAN Xiangyi, WANG Yangang, et al. Development and prospect of aspirated fan/compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 945-954. (in Chinese)
- [5] Merchant A. Aerodynamic design and performance of aspirated airfoils[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 141-148.
- [6] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A, et al. Design and test of an aspirated counter-rotating fan[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 021004. 1-021004. 8.
- [7] 刘波, 南向谊, 陈云永. 附面层抽吸对转子激波结构和分离流动的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 315-320.
- LIU Bo, NAN Xiangyi, CHEN Yunyong. Effects of BLS on the shockwave structure and separation flow of fan rotor [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 315-320. (in Chinese)
- [8] 南向谊, 刘波, 靳军, 等. 超声速压气机转子叶片吸力面抽气抑制附面层分离的机理[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1093-1099.
NAN Xiangyi, LIU Bo, JIN Jun, et al. Study of suppression boundary layer separation on the suction surface of supersonic compressor rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1093-1099. (in Chinese)
- [9] SONG Yanping, CHEN Fu, YANG Jun, et al. A numerical investigation of boundary layer suction in compound lean compressor cascades[R]. ASME Paper GT-2005-68441, 2005.
- [10] 王掩刚, 牛楠, 赵龙波, 等. 端壁抽吸位置对压气机叶栅角区分离控制的影响[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 433-437.
WANG Yangang, NIU Nan, ZHAO Longbo, et al. Effect on corner separation control for high load compressor cascade with different end-wall BLS position [J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 433-437. (in Chinese)
- [11] 王掩刚, 国睿, 任思源, 等. 跨声速叶栅叶表附面层抽吸效应试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2068-2074.
WANG Yangang, GUO Rui, REN Siyuan, et al. Experimental investigation of boundary layer suction effects on a transonic cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2068-2074. (in Chinese)
- [12] 王掩刚, 牛楠, 任思源, 等. 跨音速压气机转子叶表和端壁抽吸对比研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(11): 1843-1846.
WANG Yangang, NIU Nan, REN Siyuan, et al. Comparison of BLS on blade surface & end-wall for a transonic compressor rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(11): 1843-1846. (in Chinese)
- [13] 郭爽, 陈绍文, 陆华伟, 等. 组合抽吸对大转角扩压叶栅性能的影响[J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2697-2703.
GUO Shuang, CHEN Shaowen, LU Huawei, et al. Effect of compound boundary layer suction on the performance of a high-load diffusion compressor cascade with a large camber angle[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2697-2703. (in Chinese)
- [14] 兰发祥. 吸附式压气机设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
LAN Faxiang. Research on design technology of the aspirated compressor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [15] 葛正威. 跨声速吸气式轴流压气机设计及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院, 2007.
GE Zhengwei. Design and numerical investigations of axial aspirated transonic compressor stage [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)