

槽道出口位置对高负荷扩压叶栅性能的影响

吴培根,王如根,胡加国,郭飞飞

(空军工程大学 航空航天工程学院 陕西 西安 710038)

摘 要: 针对高负荷扩压叶栅攻角范围小、吸力面流动易分离的特点,采用在叶片上从压力面向吸力面开槽的方法控制局部流动,设计了一种收敛转折型的槽道结构,并通过数值模拟方法研究了不同开槽位置对叶栅性能的影响,计算结果表明:正攻角工况,叶片开槽处理可以有效吹除吸力面分离气流,从而增大静压升,降低总压损失,扩大稳定工作范围;对于大攻角分离情况,最佳开槽位置位于叶型中部附近。

关 键 词: 高负荷扩压叶栅; 叶片开槽; 流动控制; 大转折角; 附面层分离

中图分类号: V231.9 文献标识码: A

引 言

叶片开槽流动控制是指在叶片的某一位置开置适当结构的连接吸力面和压力面的通槽,通过槽道两端吸力面与压力面的压差,在吸力面上形成射流来增加吸力面分离区内低能流体的能量,使该区域低能流体具有更强的抗分离能力,从而达到控制或削弱分离、扩大稳定工作范围、增加栅内气流折转能力和减小损失和提高效率的目的。这种方法的优点是不需要额外附加能量和装置就能自动改善流场结构^[1-3]。这对于结构紧凑、高推重比及低耗油率的现代高性能航空发动机设计及对老机组的改良显得尤为重要。

文献[4]对单级亚音速压气机动静叶开槽进行了详尽的试验研究。文献[5]提出了轴流式压气机反流缝隙叶片的概念并进行了试验验证。文献[6]提出了确定弦向缝隙位置的数学模型,文献[7-9]设计了两段式的槽道结构,对槽道的结构位置进行了讨论,并研究了低雷诺数下开槽射流的作用。文献[10-11]研究了切向开缝技术与叶片弯曲技术相结合的控制效果。以上的研究结果都表明合理设计的射流孔、缝或槽能有效控制和抑制附面层分离,

从而提高压气机气动性能和稳定工作范围,是提高压气机工作稳定性的一种有效手段。

本研究以大转角的高负荷叶型为对象,构造了一种新型的收敛转折型槽道,通过数值研究,探讨了槽道出口位置对高负荷扩压叶栅流场特性的影响。

1 开槽处理方案

叶型来自某两级高负荷风扇(设计总压比为 4.2)第二级静叶根部,设计来流马赫数 0.75。为了实现高负荷叶栅,叶型弯角达 62.81° ,高的气动负荷使叶栅的气动特性对攻角的变化很敏感,容易产生分离区而使叶栅气动性能下降,因此,为了改善该高负荷叶栅的攻角特性,采用开槽处理方案来减小和控制分离区。在槽道设计方面,采用两段式的开槽结构,为增大槽道的出口速度,前段槽道采用收敛形式。在设计不同的开槽位置时,保持进气段收敛角度为 10° 不变,出气段长度不变,宽度为 1.6 mm,而且槽道转折角不变,槽道的出气角即出气段中线与过该交点的叶栅吸力面切线夹角始终保持为 15° 不变,以确保出口射流与叶栅通道主流的夹角相同,且不会引起射流与主流之间较大的掺混损失。方案 A、B、C 槽道出口位置分别在 55%、70%、85% 弦长处。叶栅的几何参数和槽道的几何参数如图 1 和表 1 所示。

2 数值计算方法

计算采用商业 CFD 软件 ANSYS CFX 完成。考虑流动特性、精度要求和计算能力,计算采用 Shear - Stress - Transport (SST) 湍流模型,并加入 GAMMA 转捩模型。空间离散采用二阶精度的中心差分格式,时间离散采用二阶后差欧拉格式。

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-06-21

作者简介: 吴培根(1986-),男,江西德兴人,空军工程大学博士。

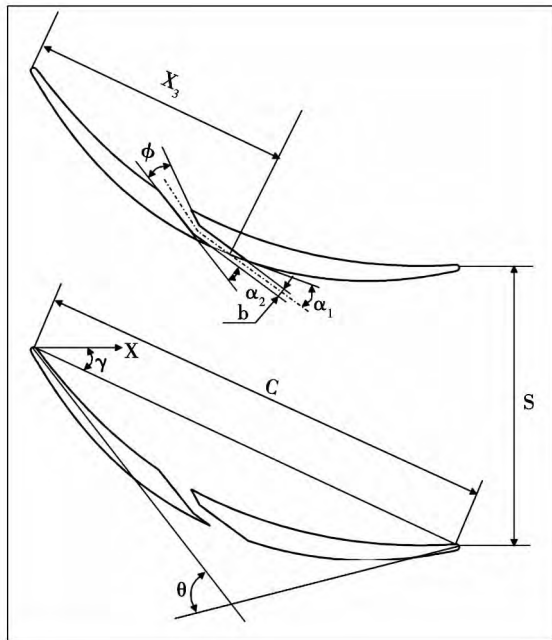


图 1 叶片开槽外形及标注

Fig. 1 Outline and indications of the slot on the blade

表 1 叶栅几何参数和槽道参数

Tab. 1 Geometrical parameters of the cascade and parameters of the slot

参数	数值
弦长 C/mm	60.7
稠度 $\tau = C/S$	2.55
展弦比 $AR = L/C$	1.65
安装角 $\gamma/(^\circ)$	25.01
弯度 $\theta/(^\circ)$	62.81
槽道宽度 b/mm	1.6
槽道出口弦向位置 X_s/C	0.55 0.7 0.85
槽道出口角 $\alpha_1/(^\circ)$	15
槽道转折角 $\alpha_2/(^\circ)$	10
槽道进气段收敛角 $\phi/(^\circ)$	10
叶高 h/mm	100

原型叶栅采用 H - O - H 结构化网格,叶片通道前缘延伸段约为一倍弦长,后缘延伸段约为 1.5 倍弦长,网格总数 120 万。开槽叶栅中槽道内网格为“H”型结构网格,槽道内网格总数 11.5 万。为了尽量减小网格质量对计算精度的影响,保证槽道内网格单元的正交性,将槽道进出口处与叶栅通道交界面调整为“V”型,计算网格如图 2 所示。小槽进出口与叶栅主通道连接的部分、进出口附近以及内壁面进行了加密。上述数量的网格确保了网格的质

量,网格最大延展比小于 2,最大长宽比小于 2000,网格正交性大于 28° ,同时,离壁面最近的网格单元 y^+ 小于 2,以准确捕捉附面层内的流动细节。

计算中,进口给定进口总压、总温,通过改变进口速度方向来改变攻角。通过改变出口背压,保证进口马赫数为 0.6 ± 0.01 。叶片表面采用无滑移绝热边界条件。数值模拟中雷诺数 Re 为 1×10^6 。

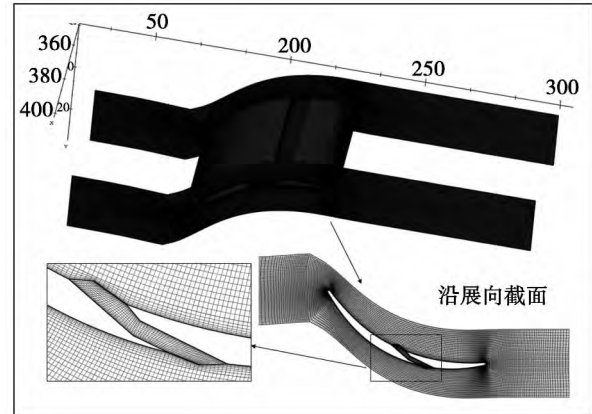


图 2 叶栅通道网格和槽道网格

Fig. 2 Mesh of the passage of the cascade and the slot

为验证数值模型的准确性,将叶片等比例放大了 1.5 倍,保持叶片的进口角、出口角、叶型弯曲角以及安装角等参数保持不变,在亚音速叶栅风洞上进行了气动实验。实验测量了进口速度 90 m/s 条件下 $0.55b$ 处开槽叶栅和无槽叶栅叶片出口尾迹的总压损失系数分布。图 3 给出了攻角为 0° 和 4° 时,总压损失分布的实验和仿真结果,可以看出,对于原型叶栅,计算和实验的尾迹中心位置基本一致,尾迹区域范围计算结果在小攻角时略大于实验数据,攻角的增加,差别增大。对于开槽叶栅,计算的尾迹深度低于实验结果,尾迹中心位置靠近压力面,采用的计算模型能够反应开槽处理后叶栅特性随攻角变化,能对叶栅流场和性能做出较为准确的预测。

3 计算结果及讨论

3.1 总体性能比较

对 3 种开槽方案以及无槽叶栅攻角 i 分别为 -3° 、 -2° 、 -1° 、 0° 、 1° 、 2° 、 3° 和 4° 时的叶栅流场进行数值模拟,得到开槽前后总压损失系数 ω 、静压系数 C_p 和气流转折角 $\Delta\beta$ 随进气攻角 i 的变化规律,如图 4 所示。

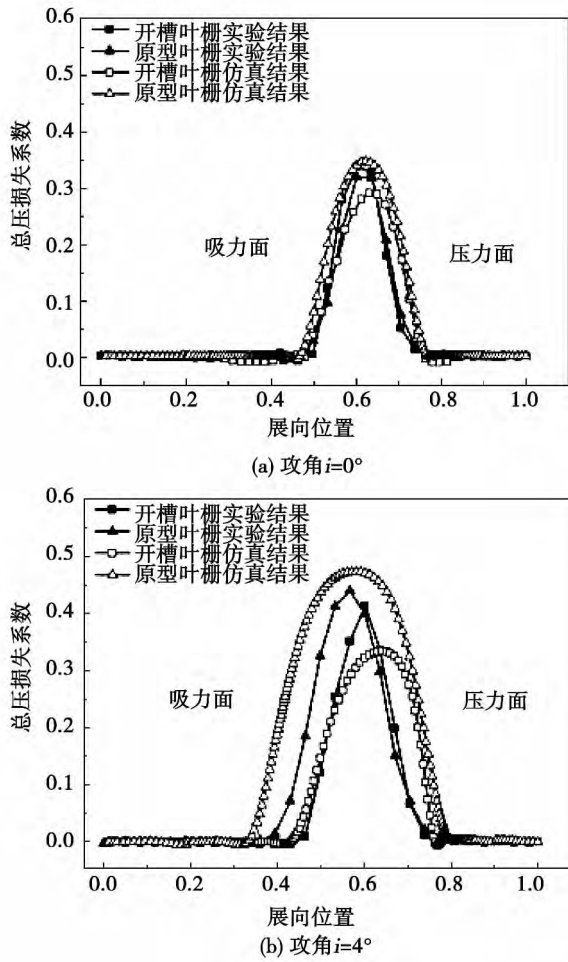


图 3 实验与仿真总压损失分布对比
Fig. 3 Comprison of the distribution of the total pressure loss of the test with that of the simulation result

总压损失系数定义为:

$$\omega = \frac{P_{10} - P_1}{P_{10} - P_{s0}} \quad (1)$$

静压系数定义为:

$$C_p = \frac{P_s - P_{10}}{P_{10} - P_{s0}} \quad (2)$$

式中: P_{10} 、 P_{s0} 一来流总压、静压; P_1 、 P_s 一当地总压、静压。

从图 4 中可以看出,原型叶栅随着攻角增大,损失增加,以总压损失系数 $\omega < 0.11$ 为稳定工作边界,原型叶栅在 3° 攻角时,损失迅速增大,流动不稳定,说明当前一级动叶来流使攻角偏离设计状态时易形成大的分离。3 种开槽方案对叶栅气动性能的影响有所不同,在攻角为 0° 时,方案 B 的流动控制效果最好,能够显著提高叶栅出口气流转折角,提高了静压系数,减少了总压损失,方案 C 有一定的流

动改善效果,但作用有限,方案 A 略微增大了总压损失;在攻角大于 0° 时,随着攻角增加,开槽位置靠近叶片前缘的方案 A 流动控制效果逐渐增强,而开槽位置靠近叶片尾缘的方案 B 和 C 流动控制效果逐渐减弱,方案 A 和方案 B 的性能曲线在攻角 2° 附近有交叉,当攻角大于交叉点时,方案 A 对于气动性能提升更大;当攻角为负时,3 种开槽方案均在一定程度恶化了流场情况,槽道出口位置越靠近叶片前缘,性能降低越明显。

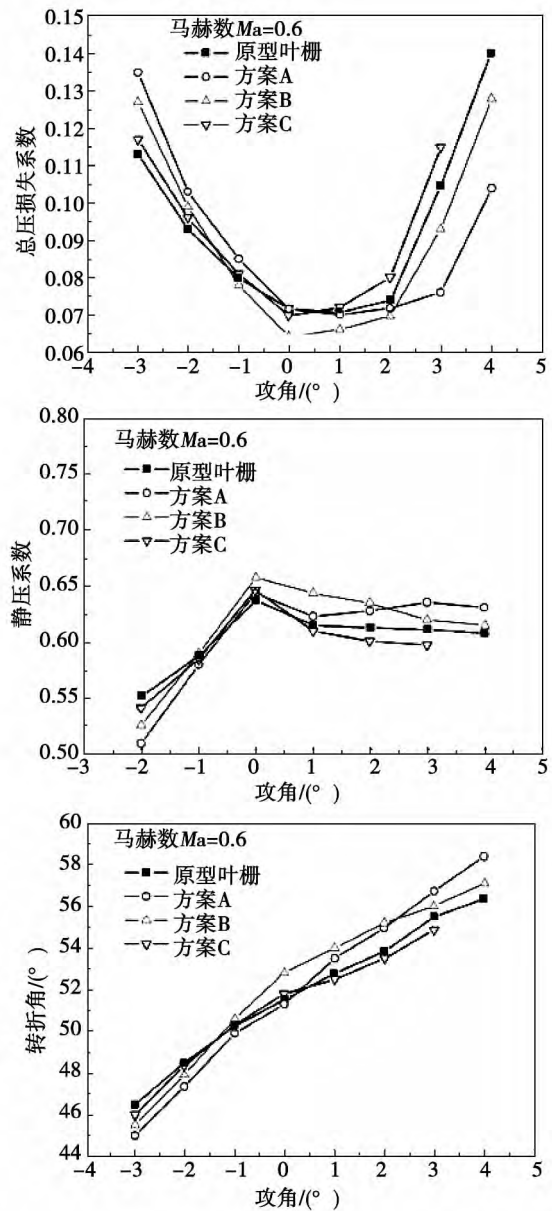


图 4 4 种叶栅特性对比
Fig. 4 Comparison of the four kinds of the characteristics of the cascade

3.2 S1、S2 流面马赫数分布

对压气机叶栅 S1 流面是在某叶片高度处全栅距范围内的流体质点向后流动形成的流面; S2 流面是叶片进口处径向或接近径向线上全叶高范围内的流体质点向后流动所形成的流面,即 S2 流面是两个

叶片之间的中间面,它把相邻两个通道内的质量流量近似地划成两等份,反映了气流沿径向的分布。3 种不同开槽方案和原型叶栅 S1 和 S2 流面的马赫数分布如图 5 和图 6 所示。

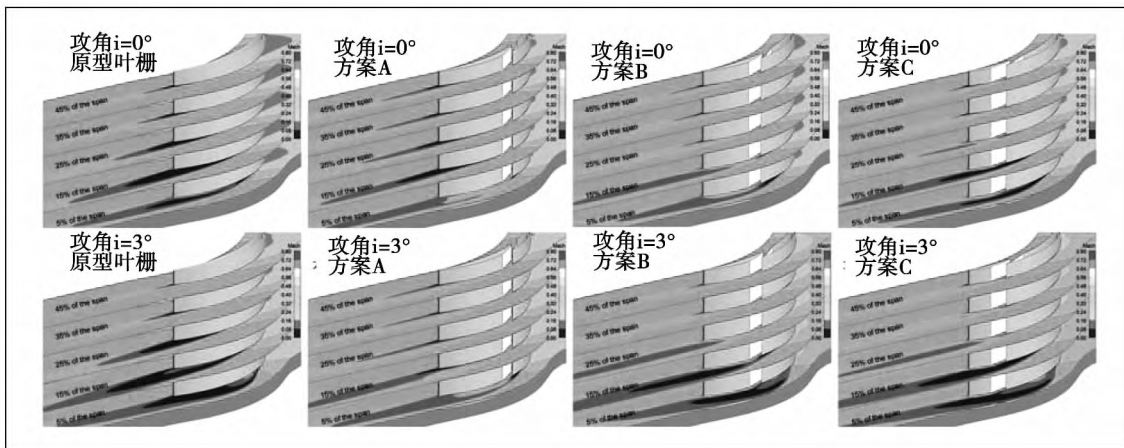


图 5 S1 流面马赫数分布

Fig.5 Mach number distribution on the S1 stream surface

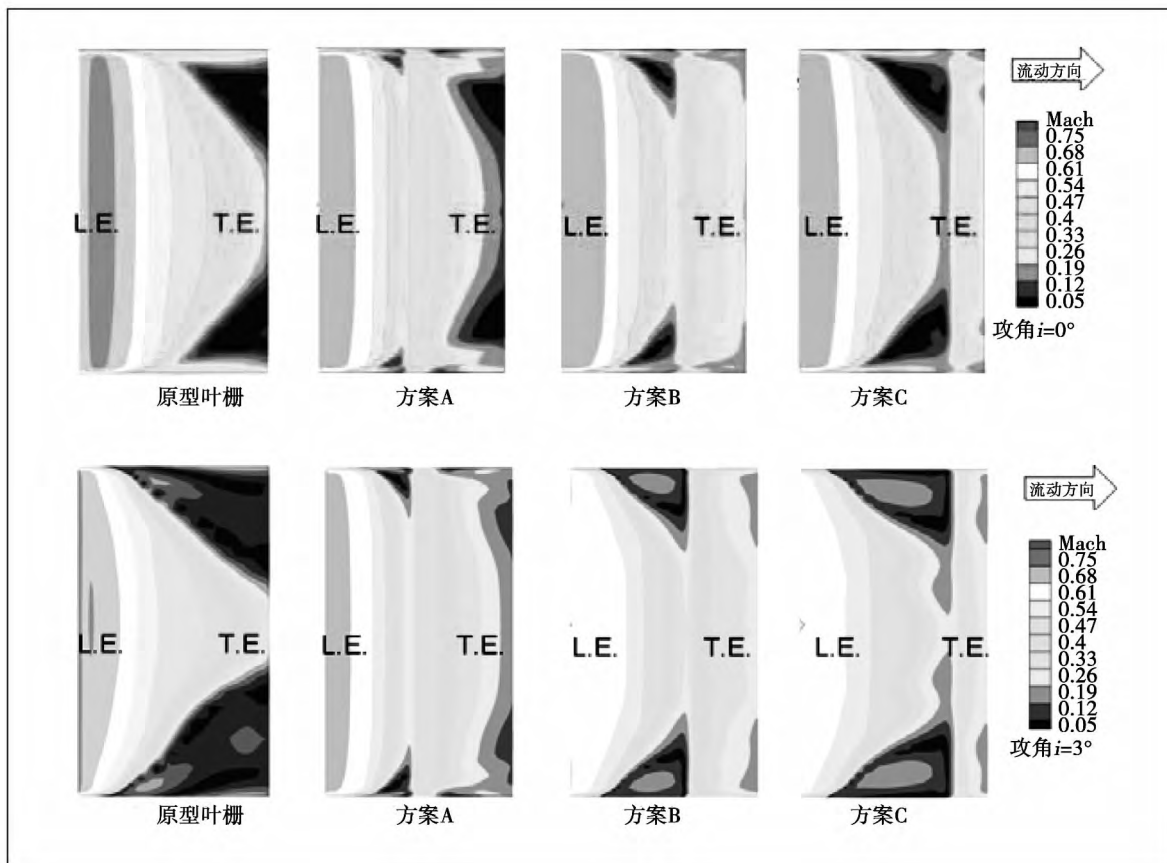


图 6 S2 流面马赫数分布

Fig.6 Mach number distribution on the S2 stream surface

从 S1 流面马赫数分布可以看出: 原型叶栅不同叶高处的 S1 流面中均存在低马赫数区, 随着向端壁的靠近, 其分布范围不断增大。进行开槽处理后, 叶栅通道内流动情况发生明显变化, 在攻角为 0° 情况下, 方案 B 能够减小所有叶高内的低马赫数区的分布范围, 而方案 A、C 在不同叶高处的流动控制效果出现了分化, 方案 A 减小了 5%、15% 和 25% 叶高的低马赫数区, 增加了 35% 和 45% 叶高的低马赫数区, 方案 C 对 25% 叶高以上的区域有优化作用, 15% 叶高以下射流优化作用不明显。在攻角为 3° 情况下, 方案 A 流动控制效果较强, 大幅减小了 15% 叶高以下的低马赫数区域, 而方案 B 和 C 对 15% 叶高以下的流动控制效果较弱。

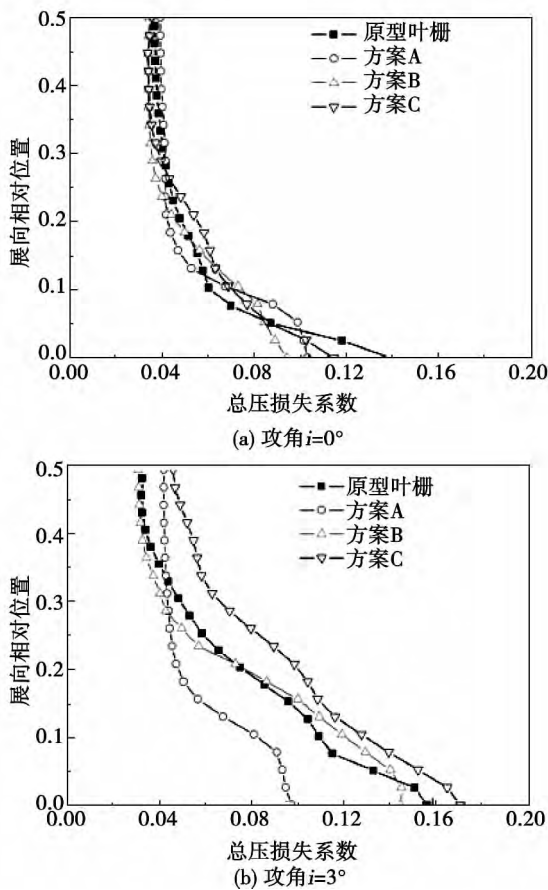


图 7 出口质量平均总压损失系数径向分布
Fig. 7 Distribution of the mass-averaged total pressure loss coefficient at the outlet along the radial direction

从 S2 流面马赫数分布可以看出: 原型叶栅, S2 流面中进口存在明显的气流加速区, 随着向下游的运动, 出现了显著的低马赫数区, 几乎覆盖了 60%

叶高范围, 随着攻角的增大, 低速区范围扩大。采用开槽处理后, 尽管 3 种开槽方案的作用效果不同, 但叶片开槽对槽道出口位置后部的气流有明显的改善作用, 低马赫数区沿展向和流向均有不同程度的减小。而在槽道出口位置之前, 端壁附近的低马赫数区范围增加, 并且位置前移, 其中, 开槽位置越靠近尾缘, 槽道出口位置之前的端壁附近流场恶化越显著。

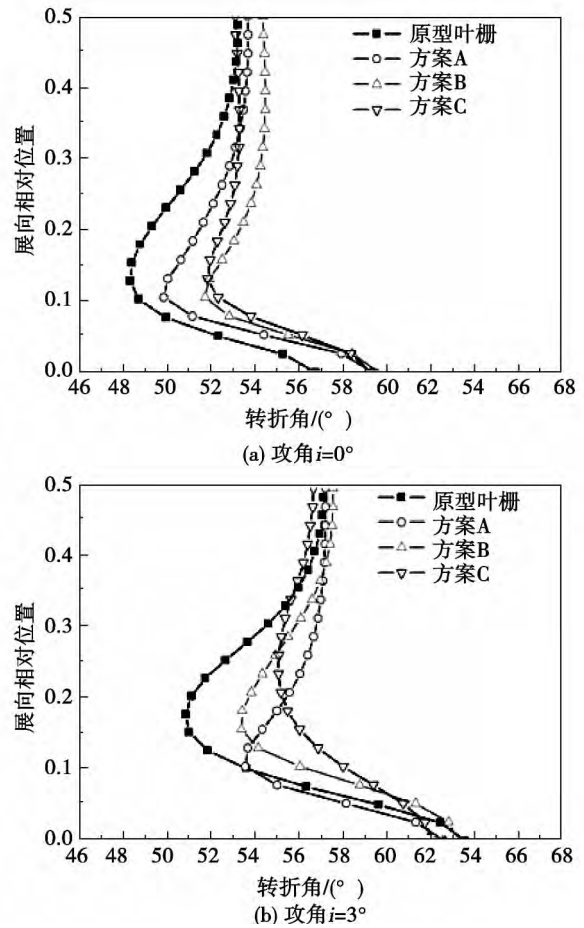


图 8 出口质量平均转折角径向分布
Fig. 8 Distribution of the mass-averaged deflection angle at the outlet along the radial direction

3.3 出口流场参数分布

不同开槽位置下, 叶栅出口质量平均总压损失系数的径向分布如图 8 所示。可以看出, 叶片开槽能使栅后流动损失得到抑制, 气流转折角增加, 但不同的开槽位置作用范围和作用效果明显不同。攻角为 0° 时, 3 种方案在接近端壁区域均减小了总压损失, 方案 B 的流动控制效果最好, 方案 C 最差, 在

5% - 30% 叶高范围附近, 方案 B、C 增加了总压损失, 而方案 A 随着径向高度增加相比原型叶栅有先增加再减小的过程, 在 30% 叶高以上靠近叶中范围, 方案 B、C 均减小了总压损失, 而方案 A 增大了总压损失。攻角为 3° 时, 方案 A 在 34% 叶高以下范围内流动控制效果很强, 可以使总压损失系数最大降低 0.05, 但在接近叶中范围内则增加了 0.01。相比较而言, 方案 B 在 24% 叶高以下增加了总压损失, 而在 24% 叶高以上减小了总压损失, 而方案 C 在整个叶高范围内大幅增加了总压损失。

不同开槽位置下, 叶栅出口质量平均气流转折角的径向分布如图 8 所示。可以看出, 原型叶栅在靠近端壁 5% - 30% 叶高处存在着欠偏转情况, 气流转折角减小, 扩压能力下降, 在 15% 叶高处的气流欠偏转严重, 这个区域的转折角与叶中部分相比落后 6°。采用叶片开槽处理后, 3 种开槽方案的气流欠偏转程度均得到有效抑制, 叶栅的扩压能力提高。

4 结 论

(1) 在正攻角工况下, 对于合理设计的槽道, 槽道出口射流可以有效抑制或延缓叶栅角区的大尺度分离, 降低总压损失, 增加气流转折角, 有效增加叶片负荷, 扩大稳定工作范围。

(2) 开槽位置对叶栅性能影响较大, 小槽出口的射流对槽道出口前端的分离没有效果, 对槽道出口位置后的区域效果很好。槽道射流能通过出口的附壁流动吹除尾缘分离。由于叶栅角区分离严重, 吸力面/端壁附近起始分离位置靠前, 因此对大弯度、高负荷叶型大攻角分离损失情况, 最佳开槽位置在叶型中部附近。

参考文献:

[1] Christoph Gmelin, Andre Huppertz, Vincent Zander, et al. Active flow control concepts on a highly loaded subsonic compressor cascade: resume of experimental and numerical results [C]. ASME 2011 - GT - 46468, 2011.

[2] Carter C J, Guillot S A, NgW F. Aerodynamic Performance of a High-turning Compressor Stator with Flow Control [J]. AIAA paper 2001 - 3973, 2001.

[3] Merchant A, Kerrebrock J L, Adameczyk J J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stage [J]. Transactions of the ASME-T-Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 43 - 51.

[4] Rockenbach R W, Brent J A, Jones B A. Single stage experimental evaluation of compressor blading with slots and vortex generators [R]. NASA CR - 72626, 1970.

[5] 徐大懋. 压气机弦向缝隙叶栅的研究 [R]. 哈尔滨汽轮机厂研究报告, 1980.

XU Da-mao. Study of the chordwise crevice cascade of a compressor [R]. Harbin: Harbin Steam Turbine Works, 1980.

[6] 鲁嘉华, 张志刚, 朱 鸿. 压气机弦向缝隙叶栅的气体动力学研究 [J]. 上海工程技术大学学报, 2000, 14(1): 14 - 20.

LU Jia-hua, ZHANG Zhi-gang, ZHU Hong. Aerodynamic research of the chordwise crevice cascade of a compressor [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Technology, 2000, 14(1): 14 - 20.

[7] ZHOU Min, ZHU Jun-qiang, LU Xin-gen, et al. Study of flow control using a slotted blade for a compressor airfoil at low Reynolds numbers [C]. ASME 2010 - GT - 22660, 2010.

[8] 周 敏, 王如根, 曹朝辉, 等. 开槽处理技术对叶片尾缘气流流动特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1100 - 1105.

ZHOU Min, WANG Ru-gen, CAO Chao-hui, et al. Influence of the slotting treatment technology on the flow characteristics of the air flow in the wake of blades [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1100 - 1105.

[9] 周 敏, 王如根, 曹朝辉, 等. 开槽位置和槽道结构对叶栅性能的影响 [J]. 空气动力学学报, 2008, 26(3): 400 - 404.

ZHOU Min, WANG Ru-gen, CAO Chao-hui, et al. Effect of the slotting location and slot structure on the performance of a cascade [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(3): 400 - 404.

[10] 陈 浮, 陈焕龙, 冯冬民. 高负荷缝隙弯曲扩压叶栅尾迹特性试验 [J]. 推进技术, 2009, 30(2): 197 - 201.

CHEN Fu, CHEN Huan-long, FENG Dong-min. Experiment of the wake characteristics of a high-load crevice curved diffusion cascade [J]. Propulsion Technology, 2009, 30(2): 197 - 201.

[11] 陈焕龙, 陈 浮, 宋彦萍. 高负荷缝隙弯曲扩压叶栅展向负荷实验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 420 - 426.

CHEN Huan-long, CHEN Fu, SONG Yan-ping. Spanwise load experiment of a high-load crevice curved diffusion cascade [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 420 - 426.

(孙显辉 编辑)

高炉炉渣余热回收技术的研究进展 = **Advances in the Study of the Blast Furnace Slag Waste Heat Recovery Technologies** [刊, 汉] WANG Bo, WANG Xi-chen, YUAN Yi-chao, ZHOU Qiu-ping (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(2). -113-120

Described were blast furnace slag waste heat recovery systems based on such technologies from foreign countries as solid particle impingement, mechanical agitation, rotary drum granulation, centrifugal granulation and air quenching etc. and summarized were the current status of the application of blast furnace slag waste heat recovery and treatment technologies in China. After the authors have compared the merits and demerits of the same kind technologies both in domestic and abroad, they pointed out that the waste heat recovery system based on the centrifugal granulation technology boasts excellent granulation performance and a high heat recovery efficiency etc. On this basis, they believed that it is necessary to further study the operating power consumption, stability, control parameters and slag particle treatment capacity of the system as well as the uniformity of the particle diameters etc. in a hope to realize its commercial applications as soon as possible. **Key words:** blast furnace slag, granulation, heat transfer, waste heat recovery

槽道出口位置对高负荷扩压叶栅性能的影响 = **Influence of the Location of the Slot at the Outlet on the Performance of a Highly-loaded Diffusion Cascade** [刊, 汉] WU Pei-gen, WANG Ru-gen, HU Jia-guo, GUO Fei-fei (College of Aeronautic and Astronautic Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, China, Post Code: 710038) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(2). -121-126

In the light of the fact that a highly-loaded diffusion cascade features a small range of the attack angle and easy separation of the flow from the suction surface, by using a local flow control method—slotting from the pressure surface to the suction one, the authors designed a converging-deflecting type slot structure and studied the influence of various locations of the slot on the performance of the cascade by using a numerical and simulation method. The calculation results show that under the operating condition at a positive attack angle, the slotting treatment of the blades can effectively eliminate the air flow separated from the suction surface, thus heightening the static pressure rise, lowering the total pressure loss and broadening the stable operation range. For a separation at a large attack angle, the optimum slotting location is close to the middle part of the blade profile. **Key words:** highly-loaded diffusion cascade, blade slot, flow control, large turning angle, boundary layer separation

扇形叶栅实验中可调导叶的应用研究 = **Study of the Applications of Adjustable Guide Blades in Sector-shaped Cascade Tests** [刊, 汉] FU Wen-guang, SUN Peng (College of Marine Engineering, Dalian Maritime Uni-