

# 跨音速压气机叶栅中稠度对弯掠叶栅 流场影响的数值分析

张永军<sup>1</sup>, 冯国泰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 将一跨音速静叶栅数值计算结果与实验结果进行了比较, 结果表明计算与实验结果吻合较好。为了讨论跨音速压气机中弯掠叶片的适用条件, 在  $0^\circ$  攻角下, 稠度为 1.75、1.50 和 1.25, 对  $0 \sim 30^\circ$  弯掠叶流场进行了数值分析, 结果表明大稠度弯掠叶片的效果较为明显。弯掠叶片使前缘激波转化为斜激波, 并减弱了通道激波的强度, 因而降低了叶栅激波损失。可以验证在跨音速条件下稠度的大小 是否在静叶栅中使用弯叶片的一个重要的参考因素。

**关 键 词:** 扩压叶栅; 弯掠叶片; 稠度; 跨音速

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

## 引 言

随着对弯、掠叶片空气动力学研究的深入展开, 在过去的几年中, 压气机中局部叶型弯曲的成熟使用, 已经吸引了人们越来越多的注意, 这也被认为是进一步改进压气机性能的方法。叶片掠和弯曲有两个方面的含义: 一是众所周知的二维流动影响; 二是在端壁的三维流动影响, 而后者更加复杂并且还没有被完全掌握。众多学者对弯、掠联合成型叶片做了大量有益的尝试, 并且在高性能压气机的设计过程中得到成功应用<sup>[1-3]</sup>。Bhaskar 对单列静叶的弯和掠的两种积迭型式叶片的效果作了对比<sup>[4]</sup>, 根据 Sasaki 的经验<sup>[5]</sup>, Bhaskar 选取了  $30^\circ$  前掠叶片和  $15^\circ$  正弯叶片, 而且 Bhaskar 的研究也极为细致, 在改变积迭线的同时也改变了弦长、冲角、安装角和展弦比, 他指出存在多种因素决定着弯、掠叶片的作用效果。文献[6~7]对稠度与弯叶片作用的相互影响做了一些研究, 但并没有涉及到掠叶片和跨音速叶栅。本文通过数值方法对不同稠度的跨音速弯掠叶片流场性能进行了分析, 目的是研究稠度大小对跨音速

弯掠叶片作用的影响, 为今后的叶片优化设计提供参考。

## 1 数值计算方法及校核

计算采用了 Fluent 商业软件的联合显式求解器, 湍流模型为低雷诺数  $k-\Omega$  的 SST 模型, 差分格式为二阶对称 TVD 迎风格式。超跨音速实验数据来源于文献[8~9], 其几何参数见表 1, 实验进口为 1.091 9 马赫数, 无人工增厚附面层。计算进口总压为 110 kPa, 湍流度为 1%, 出口静压为 70 kPa。为降低边界数值反射所带来的误差, 计算的进出口延长段都取 2 倍的弦长。计算除几何转角为  $14^\circ$  和  $10^\circ$  外, 几何参数与实验相同。图 1 为计算网格, 分 3 个网格块, 包括一个环叶片的 O 型网格和进出口各一个 H 型网格。网格  $Y^+$  最大为 5, 离开壁面第 12 个网格雷诺数  $Re_{y^+} < 200$ 。

表 1 实验几何参数

叶高 $h/\text{mm}$ 167.5	弦长 $/\text{mm}$ 125	节距 $t/\text{mm}$ 87.5
稠度 $b/t$ 1.43	展弦比 $h/b$ 1.34	安装角 $\beta_g/(\circ)$ 48.0

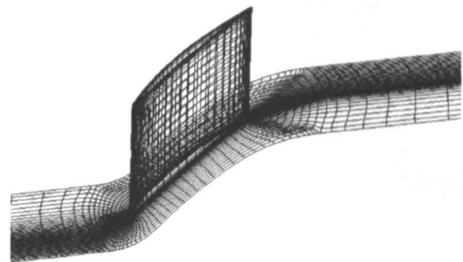


图 1 计算网格

收稿日期: 2006-09-14; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(50236020)

作者简介: 张永军(1977-)男, 陕西府谷人, 中国科学院博士后

表2列出了跨音速实验和计算的部分进出口总参数, 尽管二者的绝对值存在一些差别, 但从定性角度出发它们吻合得比较理想。图2(a)给出了实验测得的端壁上等熵马赫数的等值线分布, (b)图为计算所得的马赫数分布。实验图显示一正激波与吸力面交于40%弦长位置, 而计算结果的正激波与吸力面的位置稍向前缘移动。此外计算进出口的等熵马赫数值分别为1.138和0.845, 要比实验的1.12和0.78都大一些, 而激波前后的马赫数的差别很小。图3对比计算和实验结果的两个叶栅内的 $S_3$ 截面和一个尾迹区截面的总压云图。在计算结果中可以看到对应吸力面角区的一个1/4圆形的低压区, 而实验结果中的相同位置的低压区更象一个1/4椭圆形。在流道内, 实验测得吸力面上附面层的厚度从50%叶高到20%叶高附近逐渐减薄, 而计算结果对这一现象捕捉得并不好。在尾缘下游截面上, 实验的尾迹掺混区宽度要明显大于计算结果, 而角区的高损失区吻合的较好。综合计算和实验结果各参数的对比, 可以看出本文计算结果与实验结果吻合得较好, 反映了跨音速叶栅的流场特征。而对于实验与计算结果之间出现的差异, 究其原因存在以下

可能: (1) 计算的全端流假设; (2) 计算方法对激波的捕捉能力; (3) 计算与实验后处理方法的差别; (4) 计算与实验的进出口工况并不完全一致等。

表2 实验与计算的气动参数比较

	实验	计算
进口马赫数 $M_1$	1.091 9	1.091 0
出口马赫数 $M_2$	0.701 4	0.764 1
进口气流角 $\beta_1$	147.10	146.78
出口气流角 $\beta_2$	136.52	133.90
压比 $p_2/p_1$	1.449 8	1.405 0

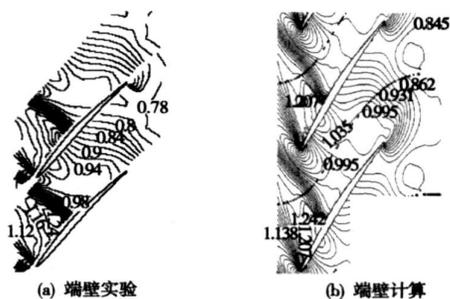


图2 端壁上等熵马赫数比较

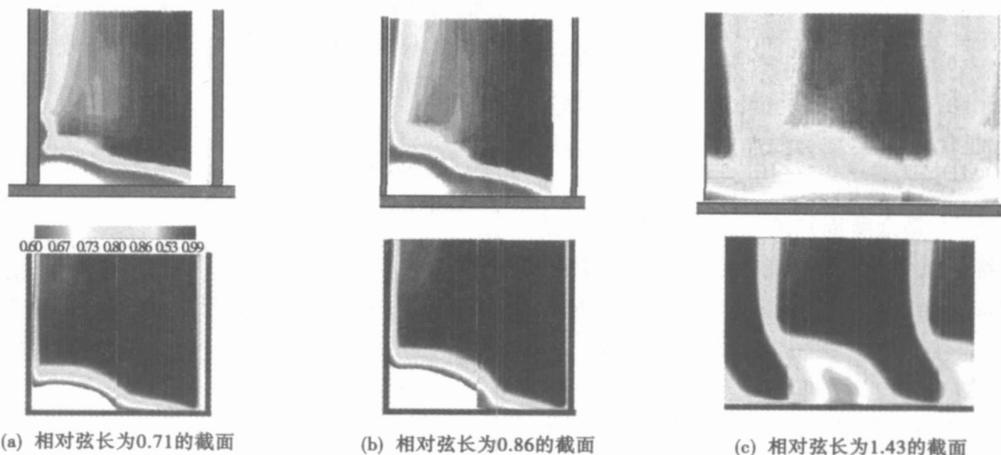


图3 流向不同截面总压系数云图比较(其中上图为实验)

## 2 弯掠叶片的设计

表3 计算叶栅几何参数

稠度 $b/t$	1.75-1.50-1.25	节距 $t/\text{mm}$	80
转角 $\theta/(\text{°})$	14	安装角 $\beta_g/(\text{°})$	41
展弦比 $h/b$	1.5	进口几何角 $\beta_{1c}/(\text{°})$	48

图4为弯掠叶片的积迭方式和3个方向上的视图, 计算叶型为TSG89-5<sup>[9]</sup>。弯掠叶片是沿垂直于弦长方向上进行弯曲的, 其积迭线由三段直线组成<sup>[10]</sup>, 与两端相连的直线段高 $L_h=20\%h$ , 中间的直线段高 $L_m=40\%h$ , 它们之间由二次曲线光滑过渡。因叶栅具有48°安装角, 所以通过垂直弦长方向弯曲的叶片具有弯和掠两种积迭特征, 弯和掠积迭量之比为:  $\sin 42^\circ : \sin 48^\circ$ 。

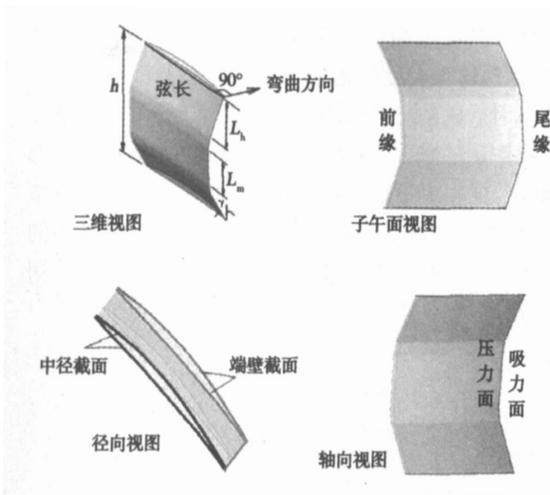


图 4 弯掠叶片设计

$$\Delta \bar{\omega} = \frac{\bar{\omega}_{str} - \bar{\omega}_{sb}}{\bar{\omega}_{str}} \quad (1)$$

其中:  $\bar{\omega}_{str}$  和  $\bar{\omega}_{sb}$  一直叶片和弯掠叶片叶栅总压损失系数, 定义公式为:

$$\bar{\omega} = \frac{p_1^* - p_2^*}{(1/2)\rho_1 v_1^2} \quad (2)$$

其中:  $p_1^*$ 、 $\rho_1$ 、 $v_1$ —进口总压、密度和速度;  $p_2^*$ —出口总压。从式(1)可以看出损失改善系数  $\Delta \bar{\omega}$  越大说明弯掠叶片对叶栅总损失的减小程度越大。图 5 横坐标为弯掠角, 纵坐标为损失改善系数, 对图 5 不同几何转角的弯掠叶片损失改善系数的对比, 可以发现大稠度叶栅弯掠叶片的损失改善系数要比小稠度弯掠叶片的大, 而且随弯掠角的增大这种差别更为明显, 这说明跨音速叶栅中在规定的范围内大稠度叶栅弯掠叶片降低叶栅损失的能力更强, 这与亚音速叶栅中稠度的影响相同<sup>[6]</sup>。

### 3 计算结果分析

图 5 为弯掠叶片损失改善系数随马赫数的变化, 这里损失改善系数的定义为<sup>[5]</sup>:

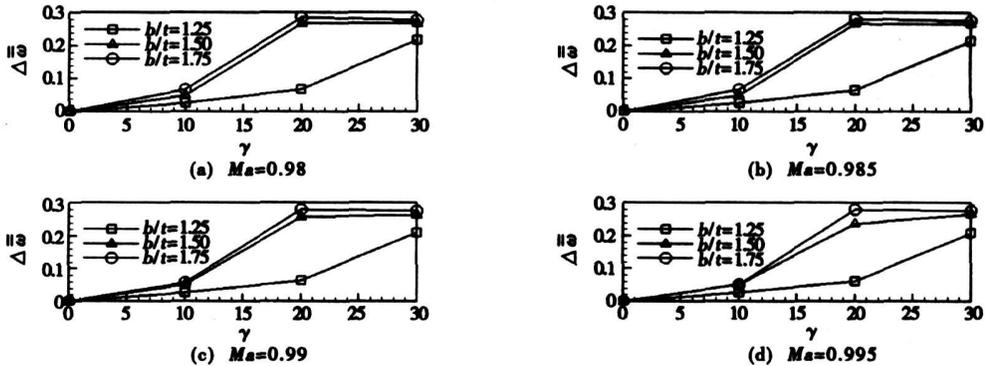


图 5 弯掠叶片损失改善系数随马赫数变化

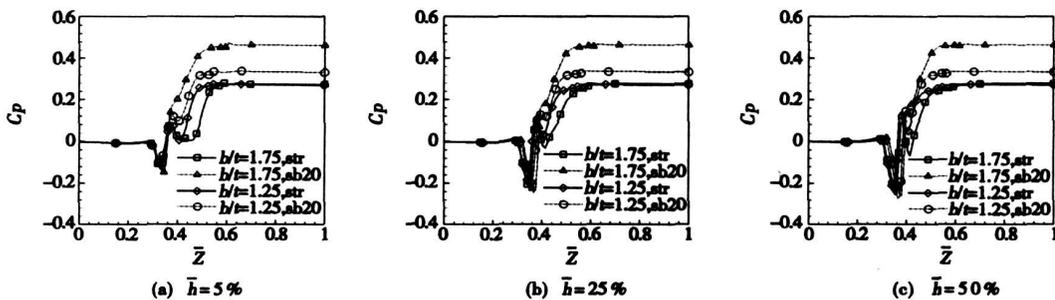


图 6 叶片表面静压系数在不同叶高位置上的分布

图 6 为静压系数沿流道中心线从进口到出口之间的发展变化, 其中 str 代表直叶片, sb20 代表具有 20° 弯角的弯掠叶片。从静压系数的分布可以看出激

波的位置和强度的变化情况。在稠度为 1.75 的叶栅弯掠叶片流道中第一道激波的各个展向位置都向下游移动了一定的距离, 从图 6 来看展向位置的移动在根

部较小而在展向中间区域较大,这就使得原来的正激波演变为斜激波,从而有可能减弱吸力面上附面层与第一道激波的干扰强度;而第二道激波在弯叶片流道中已减弱为压缩波,因此吸力面上的附面层与第二道激波的干扰作用也相应的减弱。而在稠度为 1.25 的弯叶片叶栅中,尽管第一道激波向下游也有一定的倾斜但幅度较小,而且第二激波依然存在。

图 7 给出了不同叶高处的质量节距平均总压损失系数沿流向的变化。从图 7(a)5%叶高上的损失

变化可以看出稠度直叶栅的损失要高于小稠度叶栅,这是由大稠度叶栅根部分离区和激波强度较大的原因造成的。可以看出由于吸力面附面层/激波干扰作用的减弱,分离消失,5%和 25%叶高附近弯掠叶片的损失下降,尽管 50%叶高附近损失有所增加,但如图 8 质量节距平均总压损失系数沿叶高的分布来看叶栅总损失还是下降了,而且大稠度叶栅弯叶片的损失下降总量更大。

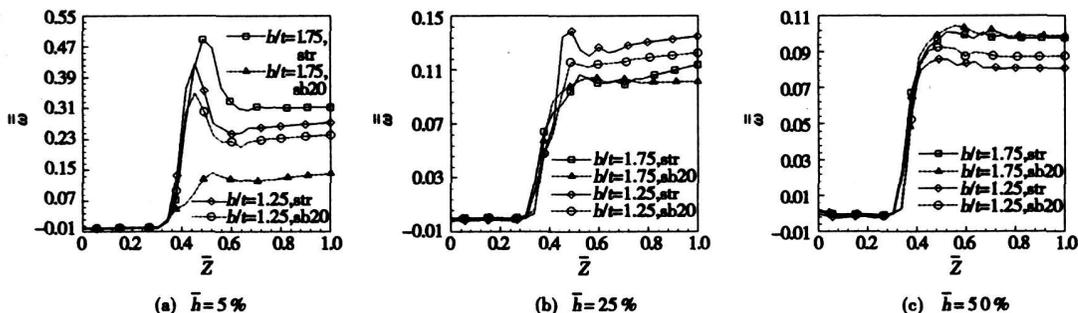


图 7 在不同叶高处质量节距平均的总压损失系数沿流向的变化

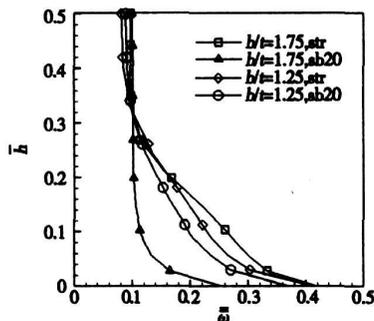


图 8 质量节距平均总压损失系数沿叶高的分布

### 4 结 论

(1) 激波和激波/附面层干扰引起的分离是跨音速压气机中叶栅损失的主要来源,在弯掠叶栅中,前缘激波在中径附近向上游倾斜而在根部向下游倾斜,从而使前缘激波由直叶栅时的正激波转化为斜激波,从而降低了前缘激波损失。同时槽道激波的强度也有所减弱,并随着叶栅稠度大小的增加,槽道激波最后可弱化为压缩波,激波损失显著降低。

(2) 尽管在 30%~70%叶高范围内,不同稠度的弯掠叶片的叶栅损失都有所增加,但相互之间的差别很小。但在端壁区域,稠度的大小对弯掠叶片激波损失的影响较大。由于在较大稠度叶栅中,槽道激波可能已弱化为压缩波,因而端区流场性能得到明显改善。

### 参 考 文 献:

- [1] WADIA A R, SZUCE P N, GUNDY BURLET K L. Design and guide vanes to reduce stator-splitter aerodynamic flow interactions[R]. ASME Paper, 98-GT-70198, 1998.
- [2] GUMMER V, WENGER U, KAU H P. Using sweep and dihedral to control three-dimensional flow in transonic stators of axial compressors [R]. ASME Turbo Expo, 2000.
- [3] LYES P. A, GINDER R. B. Low-speed compressor tests of swept and bowed blade designs[R]. ISABE 99-7048, 1999.
- [4] BHASKAR ROY, LAXMINPRASANNA P. A, VISHAL BORIKAR et al. Low speed studies of sweep and dihedral effects on compressor cascades[R]. ASME Turbo Expo, 2002.
- [5] SASAKI T, BREUGELMANS F A E. Comparison of sweep and dihedral effects on compressor cascade performance [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 454-464.
- [6] 张永军, 颜培刚, 马 岩, 等. 低速条件下稠度对扩压静叶栅弯叶片流场性能的影响[J]. 推进技术, 2006, 27(3): 234-238.
- [7] 钟兢军, 王 苇, 苏杰先, 等. 稠度对弯叶片压气机叶栅特性的影响[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 163-166.
- [8] WEBERA, SCHREIBER H A, FUCHS R. 3D transonic flow in a compressor cascade with shock-induced corner stall[R]. ASME Paper 2001-GT-345, 2001.
- [9] FUCHS R, STEINERT W, SPARKEN H. Transonic compressor rotor cascade with boundary-layer separation; experiment and theoretical results[R]. ASME Paper 93-GT-405, 1993.
- [10] 张永军, 冯国泰, 苏杰先, 等. 环形扩压叶栅弯叶片对流场性能的影响[J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 169-174.

(编辑 辉)

空气分离/烟气再循环技术基础研究进展 = **Latest Advances in Fundamental Research on Air-separation/Flue Gas Recycling Technology** [刊, 汉] / LI Qing-zhao, ZHAO Chang-sui (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 231 ~ 236

The technology for separation and recovery of carbon dioxide produced during fossil fuel combustion is regarded as a comparatively feasible measure to alleviate CO<sub>2</sub> emissions in the near future. Among the numerous CO<sub>2</sub> separation and recovery technologies, air separation/flue gas recycling technology (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion technology) has an evident edge and a relatively favorable application prospect. The overall situation of CO<sub>2</sub> emissions worldwide is described and the background for proposing the air separation/flue gas recycling technology outlined along with its latest research findings. The emphasis has been put on the exposition of pulverized coal combustion in the environment of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and the emission characteristics of various contaminants (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and super fine particles). The shortcomings and problems existing in the current research are also pinpointed. The pulverized-coal combustion rate in the environment of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> is low, featuring a kind of unstable burning and a darkening flame. The formation of pollutants and the desulfuration mechanism of a calcium-based desulfurizing agent clearly differ from those of traditional cases. To study the combustion characteristics of pulverized coal in the environment of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and concerted control mechanism of various pollutants will be a main focus for future work. **Key words:** air separation/flue gas recycle technology, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

跨音速压气机叶栅中稠度对弯掠叶栅流场影响的数值分析 = **A Numerical Analysis of the Impact of Solidity on Bowed and Swept Cascade Flow Fields in a Transonic Compressor Cascade** [刊, 汉] / ZHANG Yong-jun (Engineering Thermophysics Research Institute under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), FENG Guo-tai (College of Energy Sciences and Engineering under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 237 ~ 240

A comparison of the numerical calculation results of a transonic stationary cascade with test ones shows that the above calculation results are in relatively good agreement with the test ones. To discuss the applicable conditions of bowed and swept blades in a transonic compressor, a numerical analysis was conducted of the flow fields in bowed and swept blades having bending angles ranging from 0 degree to 30 degrees under a 0 degree incidence angle with the solidity being 1.75, 1.50 and 1.25 respectively. The numerical analysis results indicate that the effectiveness of bowed and swept blades with a high solidity is quite evident. The bowed and swept blades can transform the shock waves at the leading edge into oblique ones and meanwhile weaken the intensity of blade passage shock waves, thus diminishing cascade losses caused by shock waves. It can be verified that under transonic conditions, the magnitude of solidity is an important causative factor in determining whether to use bowed blades or not in stationary cascades. **Key words:** diffusion cascade, bowed and swept blade, solidity, transonic

基于有限元技术的大型汽轮机转子寿命评估系统 = **A Rotor Service-life Evaluation System for Large-sized Steam Turbines Based on Finite Element Technology** [刊, 汉] / WANG Kun, HUANG Shu-hong (College of Energy Source and Power Engineering under Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), HUANG Pei-wei, ZHANG Bo-lin (Hunan Electric Power Test and Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 241 ~ 244

In combination with service-life evaluation theories and numerical analysis methods for mechanical structures, a study has been conducted of a finite-element-based service-life evaluation system for rotors of large-sized steam turbines. A normalized method was adopted to process the boundary conditions of complicated actual heat exchange in rotors. The boundary