

# 折线斜缝式机匣处理的实验研究 及机理分析\*

西北工业大学 楚武利\*\* 朱俊强 刘志伟

【摘要】 本文在吸收了传统处理机匣优点的基础上, 根据本校单级轴流压气机的结构参数, 设计了一种新型的折线斜缝式处理机匣。在中低转速下, 在单级轴流压气机上对其性能进行了详细的研究, 得出了该种处理机匣的扩稳效果及轴向叠合量、背腔容积对压气机裕度及效率的影响。研究表明, 该类处理机匣不仅可以有效的改进稳定工作裕度, 而且可以使效率有所提高。文中对折线斜缝式机匣处理的机理也进行了分析。

主题词: 机匣 性能 实验 分析

分类号: V 231. 3

## 1 前言

机匣处理可有效地扩大压气机的稳定工作范围, 对缝式机匣处理, 其改进稳定裕度较显著, 但效率损失也较大。缝式机匣结构的特点是缝的长度比缝的宽度大得多, 致使缝中的气流被限制沿缝长方向流动<sup>[1]</sup>。文献[2]在实验的基础上总结了处理机匣轴向宽度、处理面积和深度以及回流的限制诸因素对处理效果的影响。文献[3]提出了一个“滚柱轴承流”模型近似代替轴向倾斜缝机匣处理缝中气流与主流间的动量交换作用, 以此解释缝式机匣处理的扩稳机理。

本文的研究对象是折线斜缝式处理机匣, 它的主要结构特征是依照进口气流方向确定前段缝的走向, 在进口无预旋的条件下, 它类似于原来的叶片角向缝, 整个缝齿再沿径向倾斜一个角度, 它类似于原来的径向倾斜缝。缝的轴向宽度以能够覆盖叶片弦长在轴向的投影为原则。其设计基本思路是希望缝齿的走向及间距能引导转子叶片尖部气流的走向, 以改变转子叶片尖部区域的气流冲角, 推迟叶背的气流分离, 延迟失速, 减小端部的流动损失。结合本校的单级轴流压气机实验台, 设计并加工了一套折线斜缝式处理机匣, 用实验的方法详细研究了轴向叠合量及背腔容积对扩稳效果及其它性能的影响。

## 2 实验装置及测量方法

实验是在西北工业大学单级轴流压气机实验台上进行的, 实验台由以下主要部分组成: 调速直流电机, 增速器, 压气机实验段, 排气段和自动控制的移动式锥体节气阀门。单级轴流压气机的轮毂比为 0. 61, 尖部直径为 0. 298 m, 设计转速为 15200 r/min, 设计压比为 1. 25, 实验前将静子叶片后移, 仅起整流作用, 对孤立转子进行实验。对稳态性能的测量采用的测试系统

由微机,DA S- 20 数据采集板,PRESTON 高精度阻隔放大器,压力探针及扫描阀,其中压力测量系统经过系统校正,测总性能时,用扭力测功仪进行测功。

3 处理机匣的结构形式

折线斜缝式处理机匣的结构形式如图 1 所示,为了表述方便,把整个处理区域定义为两段,以气流流动方向为序,第一段处理区域是缝齿的直线部分;第二段处理区域是指整个缝齿的偏斜部分,该段倾斜缝与径向成 38.3 夹角。 $L$  为整个处理区域的轴向长度, $L_0$  为处理机匣与转子叶片在叶尖处的轴向叠合量, $L_0$  可调,且定义相对叠合长度  $\bar{L}_0 = L_0 / C \times 100\%$ ,  $C$  为转子叶片叶顶处弦长的轴向投影。通过改变  $L_0$  得出 7 种不同的轴向叠合量,其数值见表 1。缝齿的直线部分与斜线部分夹角为

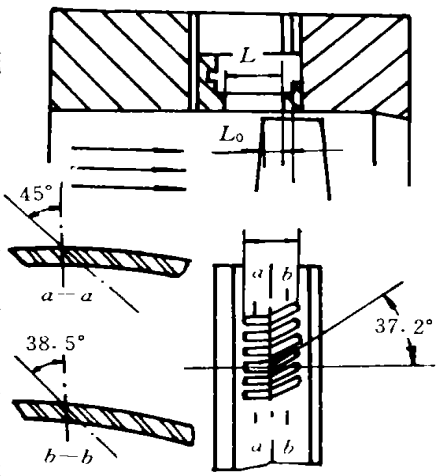


图 1 折线斜缝式处理机匣结构

37.2°;与本实验装置上动叶叶顶处的安装角一致。为研究流动机理,将处理机匣反向放置,得

表 1 各种“折线斜缝式”处理机匣的参数

| 结构型式                | NO. 1 | NO. 2 | NO. 3 | NO. 4 | NO. 5 | NO. 6 | NO. 7 | NO. 8 | NO. 9 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 轴向叠合量/(%)           | 0     | 16.6  | 33.3  | 50    | 66.6  | 83.3  | 100   | 50    | 50    |
| 容腔容积/ $\text{cm}^3$ | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 280.8 | 1572  |
| 放置方向                | 正     | 正     | 正     | 正     | 正     | 正     | 正     | 反     | 正     |

到第八种组合情况(N o. 8)。机匣外围留有较大的容腔,实验时两个容腔之间可隔开,由此构成第九种组合情况(N o. 9)。

4 折线斜缝式处理机匣结构参数对压气机性能的影响

本文采用了流量裕度改进量及综合裕度改进量两种不同的定义<sup>[4]</sup>,实验在两个换算转速  $N_{cor1} = 8270 \text{ r/min}$  和  $N_{cor2} = 10765 \text{ r/min}$  下进行,其相对转速分别为 0.54 和 0.71。

4.1 轴向叠合量对压气机性能的影响

表 2 为实验得出的轴向叠合量对扩稳效果的影响,从中看出,随着轴向叠合量的增加,压气机转子的流量裕度及综合裕度均呈现先升后降的趋势,在低转速下,以 NO. 4 机匣的扩稳效果最好,在高转速下,以 NO. 3 处理机匣的扩稳效果最佳。当叠合量为 0 时,相当于在转子的前方增加了一个扰流器,加大了叶片尖部区域的扰动,在低转速下,该扰动改变了转子尖部区域的气流冲角,延缓了分离,推迟了失速;在高转速下,这种扰动对扩稳来说是无益的,因为转速升高以后,流过转子的气流速度也增加,这时的扰动可能增加了气流的脉动,紊流区域扩大,从实验结果来看,边界点流量或者与实壁机匣持平,或者略有增加。文献[5]中介绍了国外在转子进口增加扰流器以改变转子裕度的工作,所得结论也与我们的实验结果相吻合。当轴向叠合量为 100% 时,扩稳效果比叠合量为 83.3% 的还要好,这改变了扩稳效果随叠合量增加而先升后降的规律,且高低转速下均有这种现象。

表 2 中给出了压气机转子的峰值效率和边界效率随叠合量的变化趋势。从表中数据可以

看出,当叠合量低于 50% 时,峰值效率和边界效率都有改进,当叠合量超过 50% 时,峰值效率和边界效率都在恶化,从效率的角度出发,叠合量也不宜超过 50%。

表 2 轴向叠合量对处理机匣扩稳效果及效率的影响

| 结构类型             |      |            | NO. 1  | NO. 2   | NO. 3 | NO. 4 | NO. 5  | NO. 6  | NO. 7  |
|------------------|------|------------|--------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 轴向叠合量/(%)        |      |            | 0      | 16.6    | 33.3  | 50    | 66.6   | 83.3   | 100    |
| 扩<br>稳<br>效<br>果 | 0.54 | 流量裕度改进/(%) | 10.66  | 11.33   | 21.68 | 22.79 | 21.12  | 19.85  | 26.89  |
|                  |      | 综合裕度改进/(%) | 25.47  | 16.12   | 56.43 | 62.79 | 48.08  | 40.95  | 25.55  |
|                  | 0.71 | 流量裕度改进/(%) | 2.49   | 0.09    | 23.45 | 15.04 | 10.01  | 14.83  | 17.82  |
|                  |      | 综合裕度改进/(%) | - 0.31 | - 10.40 | 33.07 | 22.47 | 5.51   | 39     | 24.69  |
| 效<br>率           | 0.54 | 峰值效率改进/(%) | 1.09   | 0.77    | 1.50  | 0.57  | - 1.16 | - 2.41 | - 1.93 |
|                  |      | 边界效率改进/(%) | 1.09   | 0.22    | 0.62  | 0.51  | - 1.24 | - 3.51 | - 2.78 |
|                  | 0.71 | 峰值效率改进/(%) | 1.67   | 1.02    | 1.37  | 0.83  | - 0.32 | - 1.12 | - 5.53 |
|                  |      | 边界效率改进/(%) | 0.41   | 0.88    | 1.33  | 0.28  | - 0.87 | - 1.60 | - 5.92 |

值得注意的是当叠合量为零时,低转速下,效率有 1% 左右的改进,高转速下,峰值效率提高略多一点,边界效率提高略少一点,联系到上述这种状态下裕度的变化,可以认为转子进口增加扰动器,对低转速下转子性能的影响要大一些,高转速下转子性能的影响要小一些,尤以边界附近如此。当叠合量为 100% 时,虽然扩稳效果较好,但效率降低太多,低转速下降低 2% 左右,高转速下降低大于 5%,已经失去了工程应用的价值。

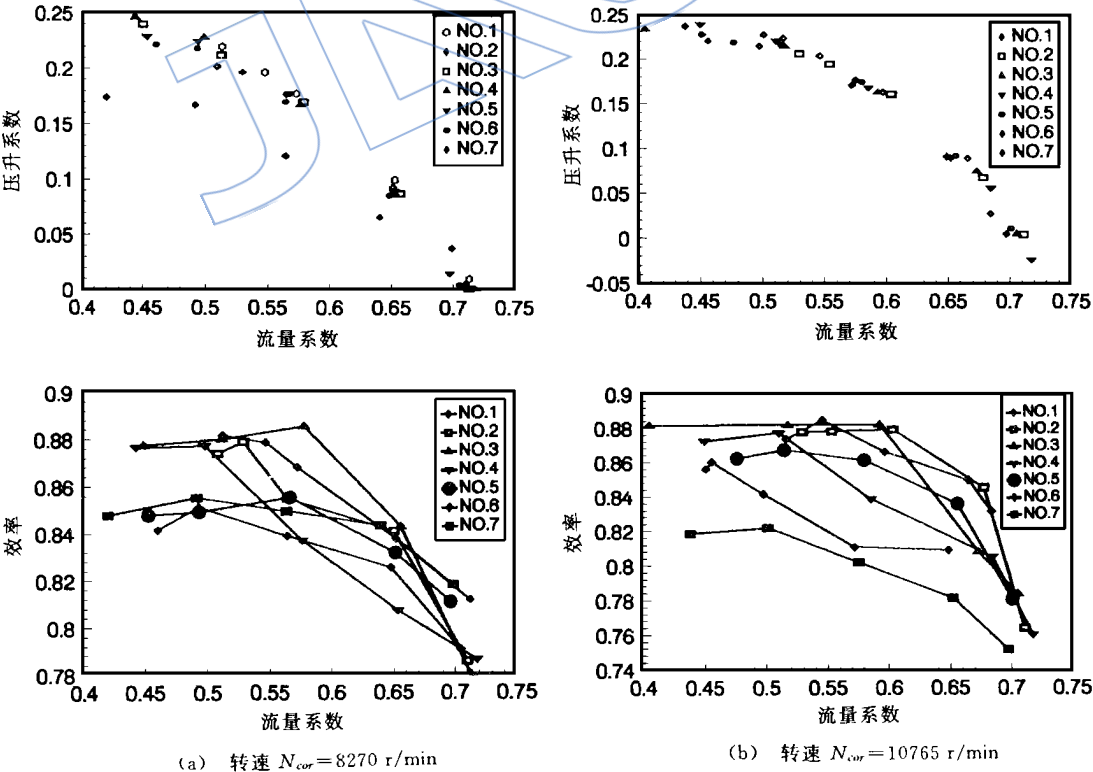


图 2 不同叠合量下转子的总性能

图 2(a) 和 (b) 给出了在不同的叠合量下, 压升系数和效率随流量的变化曲线。由于图上的曲线多, 分布密, 因此没有画出实壁机匣的性能, 将实壁机匣的主要性能参数通过表 3 给出。从

表 3 实壁机匣的主要性能参数

| 转速/(r/m in) | 峰值点流量系数 | 失速点流量系数 | 峰值点压升系数 | 失速点压升系数 | 峰值效率    | 失速点效率   |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8270        | 0. 5753 | 0. 5753 | 0. 1958 | 0. 1958 | 0. 872  | 0. 872  |
| 10765       | 0. 5306 | 0. 5306 | 0. 2294 | 0. 2294 | 0. 8699 | 0. 8699 |

图中的变化趋势可以看出, 无论在高转速或低转速下, 若其它条件保持相同, 随着叠合量的加大, 失速点流量系数先是减小, 至叠合量 50% 止, 失速点流量系数变大, 在叠合量为 100% 又减小, 但不论哪一个叠合量, 其失速点流量系数都小于实壁机匣, 裕度都有改进。对压升系数而言, 叠合量增加时, 峰值压升系数和失速点压升系数, 除低转速下的 No. 7 机匣外, 都没有十分明显的变化, 其随流量系数的变化关系也基本相同。对于同一个叠合量下的处理机匣, 低转速下压升系数的变化趋势与高转速下也不尽相同, 考虑到测量误差的作用, 微小的变化似乎难以说明问题。从图中的效率变化趋势可看出, 当叠合量在小于 50% 的范围内增加时, 峰值效率及边界效率都略有提高, 当它在大于 50% 的范围增加时, 峰值效率及边界效率都在下降, 至叠合量达到 100% 时, 效率下降达 6% 左右。对于远离边界的大流量系数下的稳定工作范围来说, 大叠合量下效率也较低。

4 2 背腔容积和放置方向对压气机总体性能的影响

表 4 给出了两个不同背腔容积下, 压气机裕度和效率的变化结果。从表 4 中的数据可以看出, 在相同的叠合量下比较时, 背腔容积成几倍地加大后, 从扩稳效果方面来讲, 几乎没有什么变化, 仅使高转速下的综合裕度降低, 也就是说, 背腔容积不宜过大。从效率方面来讲, 低转速下峰值效率及边界效率都降低, 尤以边界效率为甚。高转速下峰值效率及边界效率都略有升高, 量级在 0. 5% 左右, 峰值效率稍高一些, 边界效率稍低一些。从总体上看, 背腔容积加大后, 没有益处。

表 4 背腔容积及放置方向对压气机性能的影响

| 结构类型  | 背腔容积<br>(cm <sup>3</sup> ) | 放置方向 | 叠合量 | N <sub>ωr</sub> = 8270 r/m in |        |         |         | N <sub>ωr</sub> = 10765 r/m in |         |         |         |
|-------|----------------------------|------|-----|-------------------------------|--------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|---------|
|       |                            |      |     | 流量裕度改进                        | 综合裕度改进 | 峰值效率改进  | 边界效率改进  | 流量裕度改进                         | 综合裕度改进  | 峰值效率改进  | 边界效率改进  |
|       |                            |      |     | (%)                           | (%)    | (%)     | (%)     | (%)                            | (%)     | (%)     | (%)     |
| No. 4 | 280. 8                     | 正    | 50% | 22. 79                        | 62. 79 | 0. 57   | 0. 51   | 15. 04                         | 22. 47  | 0. 83   | 0. 28   |
| No. 8 |                            | 反    | 50% | 12. 72                        | 8. 73  | - 1. 92 | - 2. 88 | 3. 88                          | - 4. 44 | - 1. 29 | - 3. 29 |
| No. 9 | 1572                       |      | 50% | 23. 50                        | 63. 70 | - 0. 46 | - 2. 36 | 15. 04                         | 16. 21  | 0. 83   | 0. 28   |

从原则上讲, 按一定的程序完成处理机匣的设计后, 其放置方向也是一定的。本着检验处理机匣各结构参数的选择是否具有可逆性的目的及检查放置方向对处理效果影响的敏感程度, 安排了这一部分实验。表 4 给出了两个不同放置方向下压气机裕度和效率的变化。从表 4 的数据可以看出, 在相同的叠合量下比较时, 正向放置与反向放置比较而言, 反向放置没有任何工程意义, 两种转速下扩稳效果均下降, 流量裕度和综合裕度都降低, 但与实壁机匣相比, 低

转速下还有少许的扩稳效果,高转速下综合裕度的改进已成负值。这种比较说明了两个问题:第一,折线斜缝式处理机匣各主要几何参数的选择,具有强烈的针对性,尤其是缝的轴向倾斜角及径向倾斜角,必须根据具体的情况设计而定,不具有可逆性;第二,折线斜缝式处理机匣各主要几何参数的选择,对扩稳效果和效率的影响都比较显著,压气机裕度和效率这两个关键参数对处理机匣的主要几何参数相当敏感。

## 5 折线斜缝式机匣的作用机理分析

根据文献[6]中对倾斜缝机匣处理所作的研究工作可知,倾斜缝式处理机匣在工作时,存在着由叶顶下游沿着缝逆主流而上的一股喷射状的气流。缝本身起到了沟通叶顶上下游两个流动区域的作用,由于压气机增压的原因,缝的下游端感受到高静压的时均值,而缝的上游端感受到低静压的时均值,正是由于缝的前后所形成的静压差,驱使缝中的气流逆主流而上,形成了上述的喷射流。为了满足流量连续方程,进入缝内的气流以一股喷射状的流态从叶顶的上游射入叶栅槽道。也正是由于这股喷射流的作用,激励了叶顶处动叶槽道中即将分离的低能量气流,从而推迟了失速的发生。处理机匣的直段与斜段的夹角及径向倾斜角均对喷射流的方向有影响,进而影响到扩稳效果。但是,这股喷射流过强,也并不都是好事。不难想象,叶顶处基元叶片的气流流动,由于机匣处理的作用,变得相当紊乱,既有缝中逆主流而上的二次流动,也有从叶顶的上游射入叶栅槽道的射流,更有离心力驱使而形成的径向流动,这必然加大了流动损失,位于叶片正上方的NO. 7 机匣,之所以有如此低的效率,原因也出于此。而将折线斜缝式处理机匣前置后,也就减弱了缝的前后由于感受不同压力的气流所形成的压力差,减弱了射流的强度,同时也减少了损失,在基本不影响扩稳效果的前提下,提高了效率。

## 6 结 论

(1) 折线斜缝式处理机匣不仅可以扩大压气机的稳定工作范围,而且可以兼顾效率,使效率不降低或略有提高。在结构参数合适时,本文的处理机匣可使孤立转子的综合裕度最多改进 63.7% (No. 9,  $N_{\text{or}} = 8270 \text{ r/m in}$ ), 峰值效率最多提高 1.5% (No. 3,  $N_{\text{or}} = 8270 \text{ r/m in}$ ), 边界效率最多提高 1.3% (No. 3,  $N_{\text{or}} = 10765 \text{ r/m in}$ )。 (2) 折线斜缝式处理机匣的轴向叠合量对裕度和效率两个关键性技术指标有重要影响。从工程应用的角度讲,叠合量小于 50% 较合适,可兼顾效率和裕度两个指标。 (3) 背腔容积对裕度及效率的影响要小得多,当背腔容积成几倍地加大后,扩稳效果变化并不明显,低转速下效率还有所下降,因此背腔容积不宜过大。

## 参 考 文 献

- 1 刘志伟,张长生,朱方元译 压气机机匣处理文集(第 1, 2, 3 册). 西安:西北工业大学出版社,1981
- 2 Takata H, Tsakata Y. Stall Margin Improvement by Casing Treatment- It's Mechanism and Effectiveness A S M E Series A, 1977, 99(1):
- 3 Price D C. Study of Casing Treatment Stall Margin Improvement Phenomena NA SA, CR- 134552, 1974
- 4 杜辉,朱俊强,楚武利 凹槽导流片式机匣处理的结构尺寸优化研究 推进技术, 1998, 19(1):
- 5 Takata H. A Study on Configurations of Casing Treatment for Axial Flow Compressors", Bulletin of J S M E, 1985, 27 (230): 1675- 1681
- 6 Johnson M C, Greitzer E M. Effects of Slotted Hub and Casing Treatments on Compressor Endwall Flow Fields A S M E Journal of Turbomachinery, 1987, 109: 380- 387

**Key Words** Compressors Blades Non- steady flow Numerical simulation

## EXPERIMENTAL RESEARCH AND ANALYSIS OF SLOPED SLOTTED CASING TREATMENT

Chu Wuli, Zhu Junqiang, Liu Zhiwei

(7th Dept Northwestern Polytechnical university, Xi'an 710072)

**ABSTRACT** Compressor endwall treatments, such as grooves and slots can effectively delay stall and increase the weight flow range of a compressor, but the efficiency decreases. A new kind of casing treatment, called as sloped slotted casing treatment, has been designed, which absorbs the advantages of traditional casing treatments. The overall performance of compressor rotor with sloped slotted casing treatment is measured at a single axial flow compressor. The effects of the axial overlapping amount and back cavity volume on stall margin and efficiency have been found. In each case, its characteristics with the casing treatment are compared to those without it. The results show that the new kind of casing treatment can effectively increase the stall margin and efficiency. Both flow suction and injection from the treatment region makes a stall margin improvement.

**Key Words** Casing treatment Experiment Analysis

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENDWALL FLOW IN A TURBINE CASCADE

Dong Zhirui, Liu Songling, Zhang Yujin, Xu Duchun

(7th Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**ABSTRACT** The flow field of straight HP turbine cascade was investigated experimentally in a large- scale low- speed open- loop cascade heat transfer wind tunnel. Three- dimensional flow fields near the endwall of the cascade were measured by using five- hole probe at five different  $Re$ . Cotton thread and floating small ball are applied to visualization of the flow fields. The experimental results show that the pressure side leg of the horseshoe vortex destroys the structure of the incoming flow boundary layer, when it moves from Pressure Side (PS) to Suction Side (SS). Behind the pressure side leg, a new boundary layer is generated near the endwall in the cascade. The new boundary layer goes from PS to SS. However, its thickness is thinner than that in the incoming flow. The 3D- flow region occupies 40% flow passage of turbine cascade. The increase of  $Re$  intensifies 3D- flow near endwall. From the photos of flow visualization it can be seen that corner vortex is generated and developed near the suction surface of blade/endwall junction, and forms a triangle region on the suction surface. The size of visualized passage vortex is consistent with measurement result.

**Key Words** Cascades Three dimensional flow Measurements Experiment