

# 非光滑叶片对叶栅流道内通道涡影响的实验研究

赵桂林<sup>1</sup> 闻洁<sup>2</sup> 何龙德<sup>1</sup> 董志成<sup>1</sup> 许可法<sup>1</sup>

( 1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 北京航空航天大学 402 教研室, 北京 100083 )

**摘 要** 在低速平面叶栅风洞中对光滑叶片叶栅及三种非光滑叶片叶栅进行了实验研究, 以研究与光滑叶片相比, 非光滑叶片对叶栅流道内通道涡发展变化的影响。实验结果表明, 与光滑叶片相比, 非光滑叶片对叶栅流道内的通道涡有明显的影响, 通道涡的位置沿节距方向移向流道中心处, 沿叶高方向不变, 通道涡的强度有所减弱。分析了非光滑叶片的影响原因。

**关键词** 非光滑叶片; 通道涡; 叶片叶栅

**中图分类号:** O354 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2000)06-0686-05

## 1 前 言

为了合理、有效地控制叶栅流道内流动的发展变化, 减少叶栅损失, 改善叶轮机械的气动性能, 提高叶轮机械效率, 本文作者提出了一种叶片——非光滑叶片<sup>[1]</sup>, 这是一种叶片表面具有流向微槽的叶片。研究发现, 与光滑叶片相比, 非光滑叶片叶栅出口处能量损失系数明显减少<sup>[2]</sup>。

我们分析认为非光滑叶片叶栅出口处损失系数的变化, 是由叶栅流道内流动和旋涡的发展变化造成的, 为了验证这一分析, 本文对光滑叶片叶栅及三种非光滑叶片叶栅进行了风洞实验, 在叶栅流道内进行了详细的测量, 得到了叶栅流道内的二次流速度场和二次涡量场, 对光滑叶片和非光滑叶片叶栅流道内的通道涡进行了对比分析, 研究非光滑叶片叶栅流道内通道涡的发展变化。

## 2 实验模型

本实验是在平面叶栅风洞上进行的。实验叶栅采用直叶片叶栅(图 1)。实验叶栅主要的几何和气动参数为: 叶片弦长  $b=120.5$  mm, 轴向弦长  $B=118.5$  mm, 叶片高度  $H=110$  mm, 节距  $t=92$  mm, 节弦比  $t/b=0.763$ , 展弦比  $H/b=0.913$ , 叶栅进口气流角  $\alpha_1=50^\circ$ , 叶栅出口气流角  $\alpha_2=-63^\circ$ , 栅前总压  $P_0^*=10302.5$  Pa, 叶栅出口叶展中部马赫数  $M=0.055$ , 叶栅进口附面层厚度  $\delta=35$  mm。

实验加工了四种不同的实验膜片, 包括一种光滑实验膜片 ( $h=0$   $\mu\text{m}$ ), 三种非光滑实验膜片 ( $h=40$   $\mu\text{m}$ 、 $60$   $\mu\text{m}$ 、 $100$   $\mu\text{m}$ )。实验膜片一面带胶, 一面加工成光滑表面或流向微槽表面(图 2)。实验时只需加工一套叶片叶栅, 将实验膜片平整地贴在叶片表面上, 通过更换实验膜片将叶片分别改变为光滑叶片或非光滑叶片, 这大大节省了实验经费和实验时间。对非光滑叶片, 粘贴在叶片表面上的实验膜片上的微槽顺流向方向。由于四种实验膜片的厚度相同, 因此实验结果具有可比性。

收稿日期: 2000-01-06; 修订日期: 2000-08-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No.59606002)

作者简介: 赵桂林 (1965-), 男, 山东招远市人, 副研究员, 博士, 主要从事热力涡轮机械和空气动力学研究。

测量站的布置如图 3 所示, 共设置了 9 个测量面, 其中栅前 1 个, 流道内 7 个, 栅后 1 个。测量时, 沿节距方向, 除保证第一个测量点与吸力面的距离为 2 mm 外, 其余测量点之间的距离为 4 mm。沿叶高方向, 从距下端壁 5 mm 处开始, 至半叶高处, 1~8 测量面设置了 11 个测量站, 间隔 5 mm 设置一个测量站, 第 9 测量面设置了 14 个测量站, 1~13 测量站之间间隔 4 mm, 13~14 测量站之间间隔 2 mm。由于是直叶栅, 因此所有测量面都只测量到半叶高。整个叶栅实验总测量点为 1816 个, 其中第 1 和第 9 测量面有  $24 \times 14$  个测量点, 第 2 和第 8 测量面有  $17 \times 11$  个测量点, 3~7 测量面有  $14 \times 11$  个测量点。

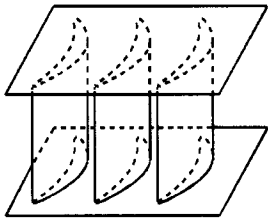


图 1 直叶栅示意图

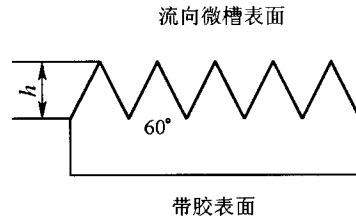


图 2 实验膜片抛面示意图

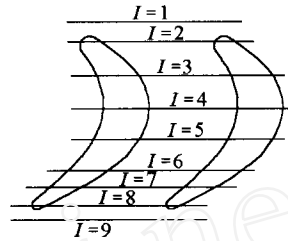


图 3 叶栅流道内测量站分布

### 3 实验结果分析

图 4 是光滑叶片叶栅和三种非光滑叶片叶栅流道内几个测量面的二次流速度场, 此图可以反映叶栅流道内主要旋涡位置和尺度的变化。由图可见, 在第 3 测量面 ( $I=3$ ), 流动位于进口段, 四种叶片叶栅流动的变化不大, 观察不到非光滑叶片的影响。到第 5 测量面 ( $I=5$ ) 时通道涡已经生成, 但非光滑叶片的影响仍不明显。从图 4 也可以看出, 从第 5 测量面 ( $I=5$ ) 通道涡生成, 到第 8 测量面 ( $I=8$ ), 叶栅流道内通道涡的强度逐渐增强, 其位置是逐步离开上、下端壁及叶片吸力面向流道中心移动。比较第 6 和第 8 测量面 ( $I=6,8$ ) 的结果, 对光滑叶片, 通道涡在靠近吸力面处的径向流动比较强。对三种非光滑叶片, 通道涡在靠近吸力面处的径向流动减弱, 说明通道涡的强度减弱。比较光滑叶片和非光滑叶片叶栅流道内通道涡位置, 在第 6 测量面 ( $I=6$ ) 几乎观察不出通道涡的位置有什么不同, 但在第 8 测量面 ( $I=8$ ) 可以观察到通道涡的位置沿叶高方向几乎不变, 在节距方向则离开叶片吸力面向流道中心处移动。通道涡的位置离开吸力面向流道中心处移动了约 5% 节距。

图 5 是光滑叶片叶栅和三种非光滑叶片叶栅流道内几个测量面上的二次涡量等值线分布, 该图可以更清楚地反映出叶栅流道内通道涡位置和强度的变化。图中取逆时针旋转的旋涡的二次涡量为正。在第 3 测量面 ( $I=3$ ), 靠近叶片压力面的上、下端壁附近, 出现较弱的旋涡运动。这一旋涡运动的中心随着叶栅流道的转折, 逐渐向叶栅叶片吸力面移动, 到第 5 测量面 ( $I=5$ ), 这一旋涡运动的中心已移到叶片吸力面附近, 这一旋涡运动就是叶栅流道内的通道涡, 在叶栅流道内通道涡中心逐渐从叶片压力面向吸力面移动, 并逐渐远离叶栅端壁, 向叶展中部移动, 通道涡的这些变化特性说明, 通道涡是马蹄涡的压力面分支在叶栅流道内发展生成的。从第 3 测量面 ( $I=3$ ) 的结果可看出, 在紧靠叶片吸力面处, 出现了与通道涡反向旋转的旋涡运动, 这一旋涡运动在叶栅流道内逐渐加强, 其中心的位置则随通道涡中心的移动而向叶展中部移动, 分析认为这一旋涡运动是马蹄涡

的吸力面分支在叶栅流道内的发展造成的。比较叶栅流道内的几个测量面 ( $I = 3 \sim 8$ ), 由于实验过程中, 测量点的布置离叶片压力面比较远, 因此在压力面附近不能观察到非光滑叶片的作用。而在紧靠叶片吸力面处, 仍然由于测量上的难度, 不能清楚地观察到非光滑叶片对马蹄涡吸力面分支在流道内的发展的影响作用。但非光滑叶片对叶栅流道内通道涡发展的影响却比较明显。这一影响是在通道涡的中心移到靠近吸力面时 (第 5 测量面  $I=5$ ) 才逐渐明显的, 到第 8 测量面 ( $I=8$ , 即叶栅出口处) 更加明显。由第 8 测量面 ( $I=8$ ) 的结果可见, 与光滑叶片叶栅相比, 非光滑叶片叶栅流道内通道涡中心的位置沿叶高方向几乎不变, 在节距方向上则移向叶栅流道中心处。对实验数据处理得到的

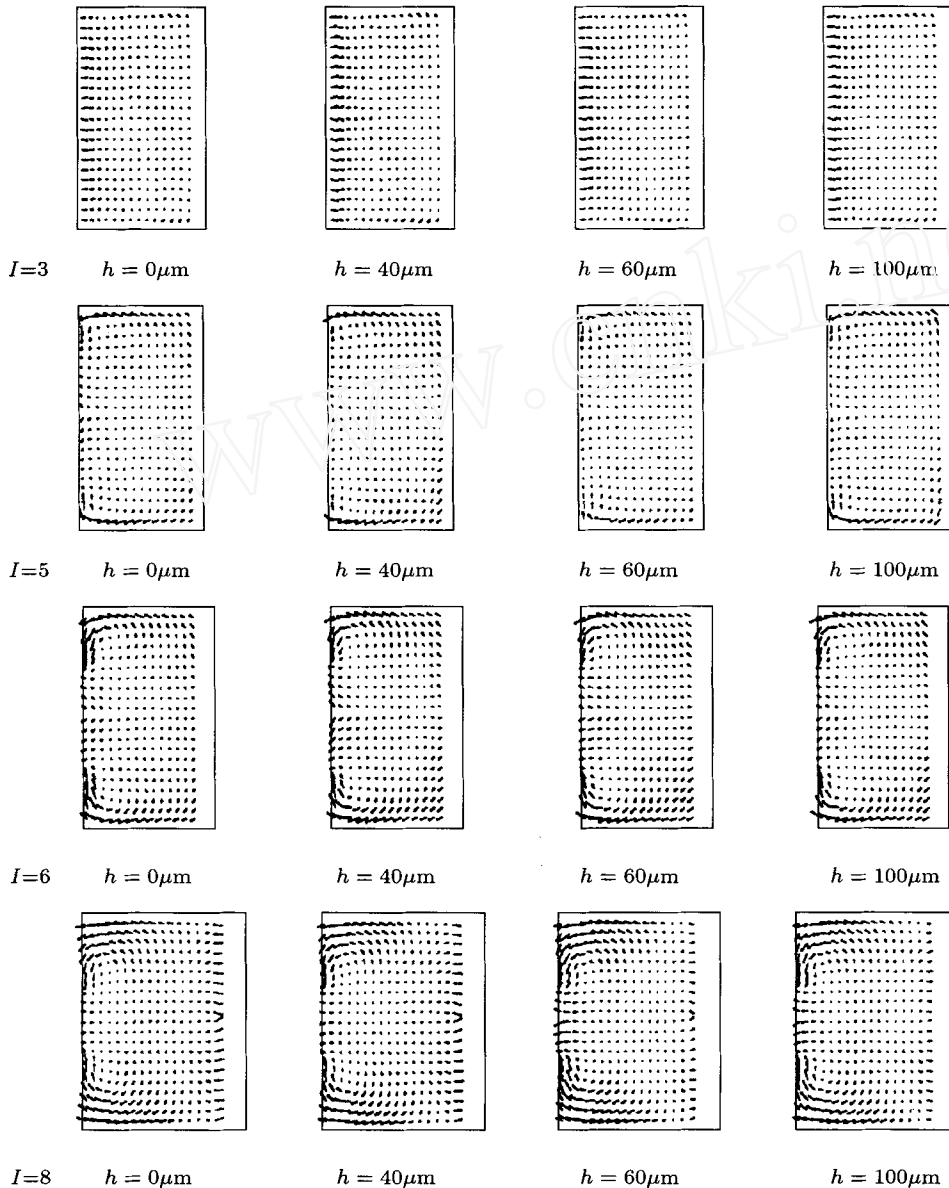


图 4 四种叶片叶栅流道内几个测量面的二次流速度场 (左为吸力面, 右为压力面)

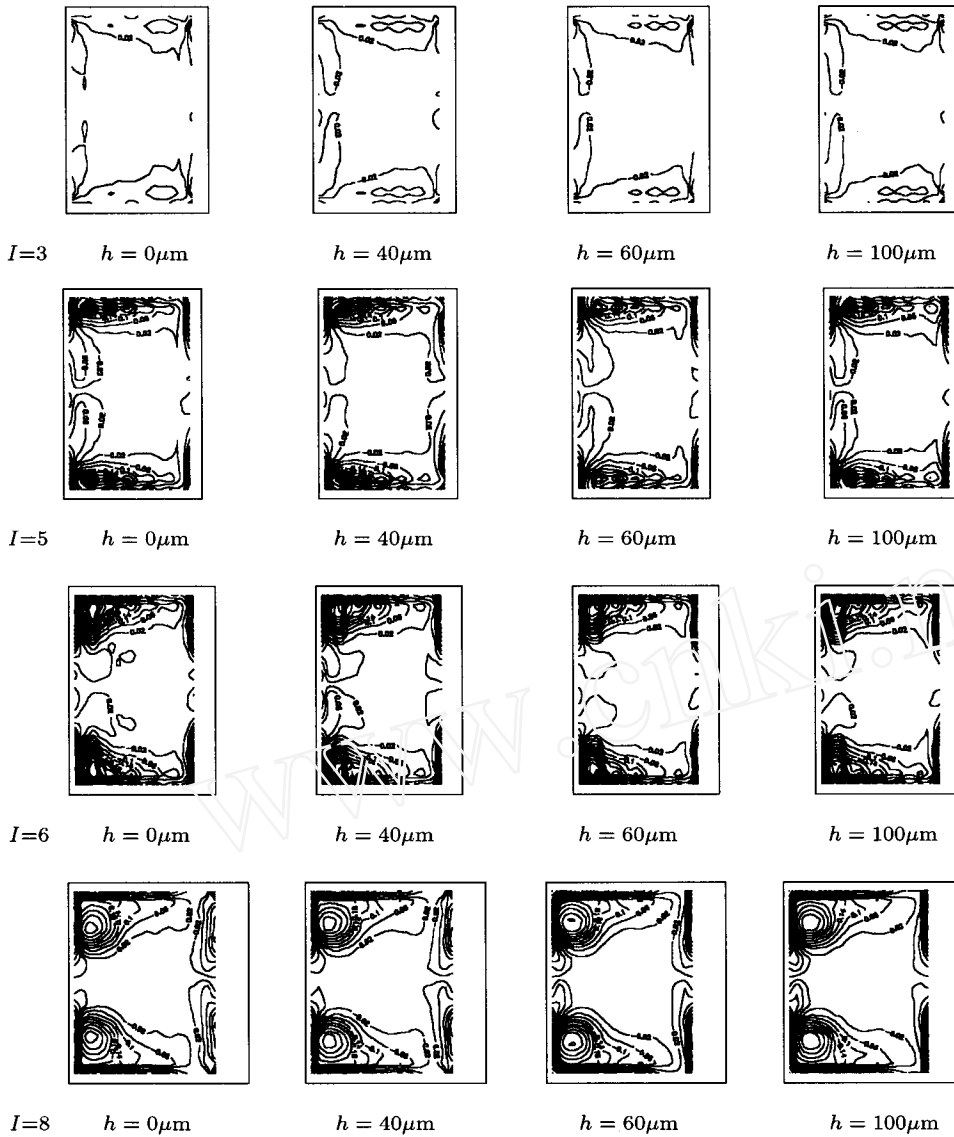


图 5 四种叶片叶栅通道内几个测量面上的二次涡量等值线 (左为吸力面, 右为压力面)

二次涡量最大值表示了通道涡的强弱, 二次涡量最大值越大, 通道涡越强, 实验结果表明, 与光滑叶片叶栅相比, 非光滑叶片叶栅通道内通道涡的二次涡量最大值有所减小, 说明通道涡的强度有所减弱, 三种非光滑叶片 ( $h = 40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ ) 叶栅通道内通道涡的二次涡量最大值分别减小 6.6%、2.8%、4.9%。

总之, 非光滑叶片对叶栅通道内通道涡的影响是造成通道涡的强度减弱, 通道涡中心的位置在节距方向上向通道中心处移动。正是非光滑叶片对通道涡的这种影响造成叶栅出口处流向涡系发生变化, 叶栅的损失系数减小。

实验结果 (图 4 和图 5) 表明采用非光滑叶片后叶栅通道内通道涡受到了明显的影响。分析原因认为, 首先是叶片表面上的流向微槽阻止了叶片表面上附面层沿流向的增

长和分离,改变了叶片表面的流动特性。其次是叶片表面上的流向微槽抑制了流体的展向(即沿叶高方向)流动,进一步改变了叶片表面的流动特性。由于马蹄涡吸力面分支是紧靠叶片吸力面发展变化的,而叶片表面上(尤其是吸力面上)附面层的发展受到流向微槽的抑制,因此马蹄涡吸力面分支的发展要受到影响(这一影响在本实验中没能观察到)。在马蹄涡压力面分支生成的通道涡中心移到吸力面附近时,由于受到了马蹄涡吸力面分支变化的影响,造成其位置和强度发生变化。总之,分析认为,叶片表面的流向微槽首先影响了马蹄涡吸力面分支在叶栅流道内的发展变化,进而由马蹄涡压力面分支的变化来影响叶栅流道内通道涡的发展变化。本文中只验证了通道涡所受的影响,有必要进行进一步的实验来验证流向微槽对马蹄涡吸力面分支的影响。

## 5 结 论

(1) 采用非光滑叶片对叶栅流道内的通道涡影响明显。通道涡的位置在节距方向上移向叶栅通道中心,在叶高方向位置不变。通道涡的强度有所减弱。

(2) 分析认为,叶片表面的流向微槽首先影响了马蹄涡吸力面分支在叶栅流道内的发展变化,进而由马蹄涡压力面分支的变化来影响叶栅流道内通道涡的发展变化。

## 参 考 文 献

- [1] 赵桂林等. 非光滑叶片叶栅的气动性能. 见: 中国工程热物理学会热机气动热力学年会论文集, 洛阳, 1997
- [2] 闻洁, 赵桂林. 非光滑叶片对叶栅出口损失分布影响的实验研究. 航空动力学报, 1999, 14(6)

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTS OF NON-SMOOTH BLADES ON PASSAGE VORTEX

ZHAO Guilin<sup>1</sup> WEN Jie<sup>2</sup> HE Longde<sup>1</sup> DONG Zhicheng<sup>1</sup> XU Kefa<sup>1</sup>

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Faculty 402, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)*

**Abstract** In the low speed plane cascade wind tunnel, the experiments for the cascades equipped with conventional smooth blades, three non-smooth blades were carried out to study the effects of non-smooth blades on the passage vortex. The experiment results show that using non-smooth blades can change the passage vortex.

**Key words** non-smooth blade; passage vortex; blade cascade