

文章编号: 1000-8055(2002)03-0336-05

带射流冲击的短扰流柱排内流场的实验研究

向安定, 张 丽, 刘松龄

(西北工业大学 航空动力与热力工程系 陕西 西安 710072)

摘要: 用五孔针对带射流冲击的单排短扰流柱内的流场作了详细的测量, 得到并分析了带射流冲击的短扰流柱排内的速度分布规律及流场内的漩涡分布。在实验中清楚地探测到流动在靠近扰流柱表面附近速度较大, 在对称中心区域发现了一大片低速区, 并有回流和漩涡产生。实验发现由于端壁效应和扰流柱表面的流动分离造成扰流柱排内有较强的漩涡流动, 扰流柱根部有马蹄涡产生, 扰流柱后尾迹区有湍流涡的发展, 流道内侧向压力分布不均匀可形成通道涡。与无射流情况比较发现扰流柱表面分离点后移, 尾迹区明显减小。

关键词: 涡轮叶片; 扰流柱; 射流冲击; 马蹄涡; 通道涡; 端壁效应

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Flow Field Measurements Around a Row of Short Cylinders with Jet Impingement

X IANG A-n-ding, ZHANG L i, L U Song-ling

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Detailed experimental measurements of the flow fields around a row of short cylinders with jet impingement by using a five-hole probe have been conducted. The three dimensional velocities and vortex distribution were demonstrated and studied. The experimental data show that the largest velocity was observed at the place very close to the cylinder surface, velocities decreased rapidly in lateral direction from the surface to the symmetric plane of the channel where low velocity flow was found together with reverse flow and vortex. Endwall effect and flow separation result in strong vortices in cylinder array. Interaction of cylinder and endwall boundary layer produces horseshoe vortex at the root of the cylinder. In the wakes turbulent vortices exist. The lateral variation of pressure leads to the producing of channel vortex. As compared with the flow field without jet impingement, the angular position of separation on the surfaces of cylinder moved downstream and the width of wake was reduced obviously.

Key words: turbine blades; pin fin; jet impingement; horseshoe vortex; channel vortex; endwall effect

1 引 言

扰流柱排是强化传热的一种重要形式, 特别是在涡轮叶片尾缘区, 常采用多排短扰流柱以强

化换热。至今国内外的研究^[1~3]基本上是针对无射流冲击情况圆柱形状扰流柱排, 为了对涡轮叶片尾缘区采取更为有效的冷却措施, 在扰流柱排前加上一排孔板, 以产生射流直接冲击扰流柱面,

收稿日期: 2001- 05- 14; 修订日期: 2001- 10- 28

基金项目: 美国联合技术中心(UTRC)资助项目; 普惠公司(Pratt & Whitney)资助项目

作者简介: 向安定(1975-), 男, 重庆人, 西北工业大学航空动力与热力工程系博士生

达到增强扰流柱通道内换热的结果。本文对通道内的流场作了详细的测量, 并与无射流冲击情况进行了比较, 以期能够认识扰流柱通道中漩涡、二次流现象和速度分布情况。

2 实验装置

实验是在矩形截面吸气式风洞中进行。实验段结构及有关几何参数见图1。其中扰流柱直径

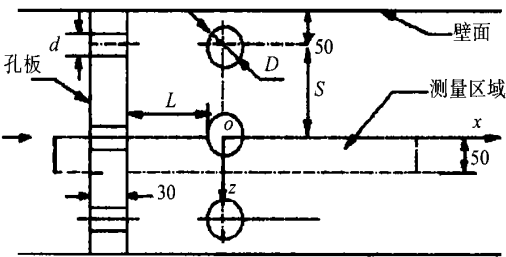


图1 实验段结构示意图 (单位: mm)

$D = 50\text{ mm}$, 孔板与扰流柱之间距离 $L = 65\text{ mm}$, 扰流柱间距 $S = 100\text{ mm}$, 通道高 $H = 30\text{ mm}$, 喷孔直径 $d = 26\text{ mm}$, 喷孔中心在高度方向为 $y = 15\text{ mm}$ 。孔板上游通道进口处端壁横向放置两根直径6 mm、长300 mm 的长圆柱体, 使来流边界层变为紊流。由于对称分布, 实验测量了半个高度通道的流场, 用的球形五孔探针^[4, 5]直径为2 mm。实验在不同几何条件和不同雷诺数下进行, 在不同几何尺寸下, 通过改变喷射雷诺数 Re_{JD} 的值来满足不同的工况要求, 其中喷射雷诺数范围为 $30,000 \leq Re_{JD} \leq 190,000$ 。

3 实验结果与分析

3.1 来流边界层

图2给出了 $Re_{JD} = 190,000$ 时在扰流柱排上游395 mm 截面处3个不同 z 向位置上的测得的来流边界层速度分布。3条曲线几乎完全重合, 表明来流是二维的。在边界层内速度分布基本符合 $1/7$ 次方规律, 从图上可以看出来流已达到充分发展状态。

3.2 扰流柱通道内的速度分布

本实验选取测量区域中扰流柱下端面中心为坐标原点, 用五孔针对各截面在高度方向测量了10个位置, 展向测量了11个位置, 探针距扰流柱的最小距离为2 mm, 在某些截面还适当的增加了测点, 本文雷诺数定义如下:

$Re_{JD} = \rho_{\infty} U_j D / \mu_{\infty}$

$Re_{\infty} = \rho_{\infty} U_{\infty} D / \mu_{\infty}$

其中: D 是扰流柱的直径, U_j 为实验段喷孔出口处气流平均速度, U_{∞} 是来流平均速度。

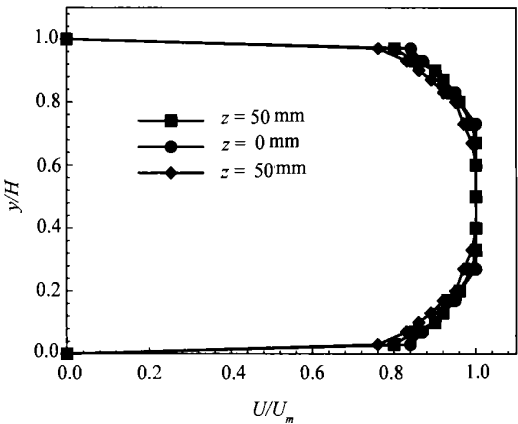


图2 来流边界层速度分布

带射流冲击和无射流冲击的比较是在保证来流流量相同的条件下进行的。本实验选取测量区域中扰流柱下端面中心为坐标原点, 用五孔针对各截面在不同高度方向和展向位置对扰流柱排通道内的流场进行了测量, 探针距扰流柱的最小距离为2 mm, 在端面附近还适当的增加了测点。本节以工况 $Re_{JD} = 190,000, L = 65\text{ mm}, D = 50\text{ mm}$ 为例进行分析, 图3给出了部分截面的全速度等值线分布。在 $x = -31\text{ mm}$ 截面, 该截面位于孔板与扰流柱排之间的区域, 由于气流流经喷孔后形成射流, 在范围为 $0 < z < 20\text{ mm}, y > 5\text{ mm}$ 的区域形成高速区, 随 z 值的增大速度逐渐减小。在 $x = 0\text{ mm}$ 截面, 实验发现在靠近扰流柱表面附近有较大速度, 随 z 值的增大速度迅速减小, 在 $35 < z < 50\text{ mm}$ 区域内形成很大一片低速区, 从图中还可以明显地看到端面附近也有速度较大的气流, 这是本文的重要发现之一。在位于扰流柱下游的 $x = 31\text{ mm}$ 截面上, 可看出扰流柱后面尾迹区速度较小, 随 z 值的增大速度逐渐增加, 在 $z = 12\text{ mm}$ 左右达到最大值, 然后随 z 值的增大速度又逐渐降低, 在 $25 < z < 50\text{ mm}$ 区域形成很大一片低速区, 扰流柱通道内的流动呈现了明显的三维特性。

图4给出了无射流冲击时 ($D = 50\text{ mm}, Re_{\infty} = 34,000$) 相应截面的速度等值线分布。可以发现: 无射流冲击时, 沿侧向 z 方向速度变化比较平缓, 速度梯度较小, 靠近扰流柱附近区域速度较

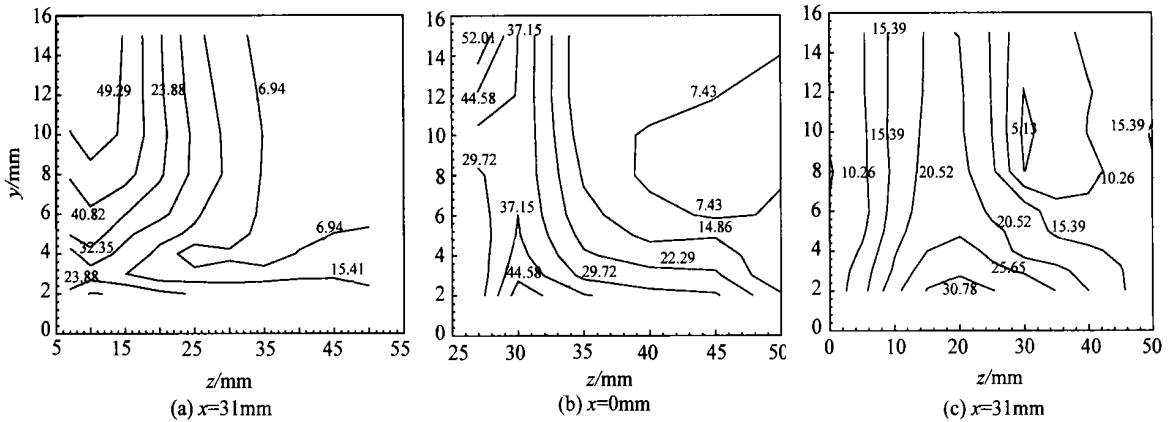


图3 带射流冲击的速度等值线分布

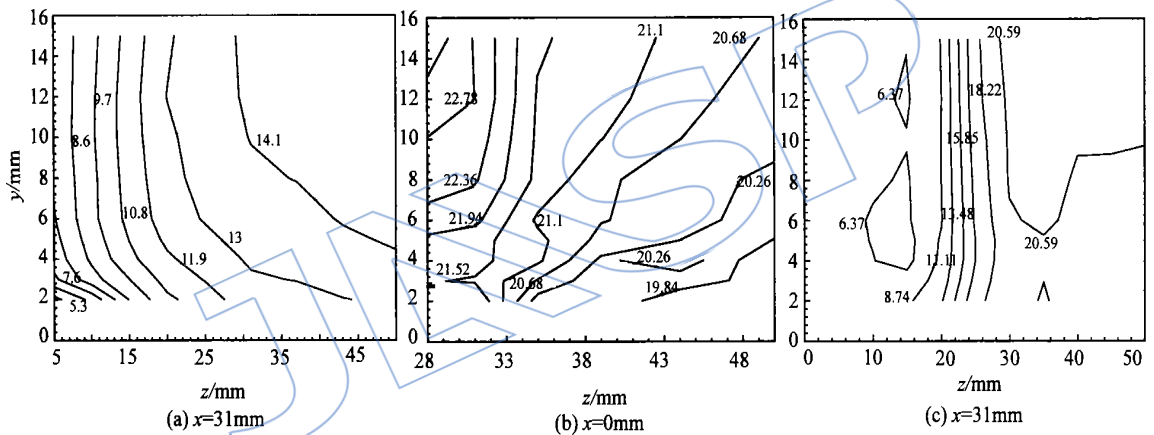


图4 无射流冲击的速度等值线分布

大,其他区域流动较为平稳,在端面附近没有速度较大的气流,流动表现出明显的二维特性,在扰流柱尾迹区形成一大片低速区,和带射流冲击情况有明显的差别。

3.3 扰流柱通道内的漩涡分布

实验发现在扰流柱排内部至少有3种涡,扰流柱的后半部由于流动分离会产生分离涡;由于通道内侧向的压力差造成二次流动,并形成通道涡;由于存在端壁边界层,在扰流柱前缘会形成马蹄涡,并沿柱面向下游发展。马蹄涡和通道涡产生于端壁效应,有很强的三维特性,在带射流的短扰流柱排中,这两种涡更具有重要性。

图5为部分截面二次流矢量图,在喷孔进口 $x = -133\text{ mm}$ 截面,气流由矩形通道进入喷孔,流到面积急剧减小,该区域气流流动方向有很大转

变,形成通道涡。从图上可以看到在整个通道范围内流动形成较大的旋转,通道涡是由于 z 方向的压差造成的。在位于扰流柱排前半部的 $x = -15\text{ mm}$ 截面上,可以明显地看出在扰流柱根部的马蹄涡。还可以看到相当强的沿柱面向端面的二次流,这样的流动使柱面附近的高速气流移向端面,形成了端面上的高速气流层。在扰流柱后半部的 $x = 15\text{ mm}$ 截面上,各种漩涡经过相互作用和发展,扰流柱根部的马蹄涡向扰流柱两侧延伸,同时有分离涡的出现。

图6给出了扰流柱排在不同高度平面上 ($y = 2\text{ mm}$, $y = 15\text{ mm}$) 的速度矢量分布(由于坐标比例不一致,柱子显示为椭圆型)。从图中可以观察到,在扰流柱和孔板之间,由于射流的卷吸作用,会形成很大一个顺时针方向的漩涡,此漩涡内的速度很低。比较图6(a)与(b)可以看出,在扰流柱

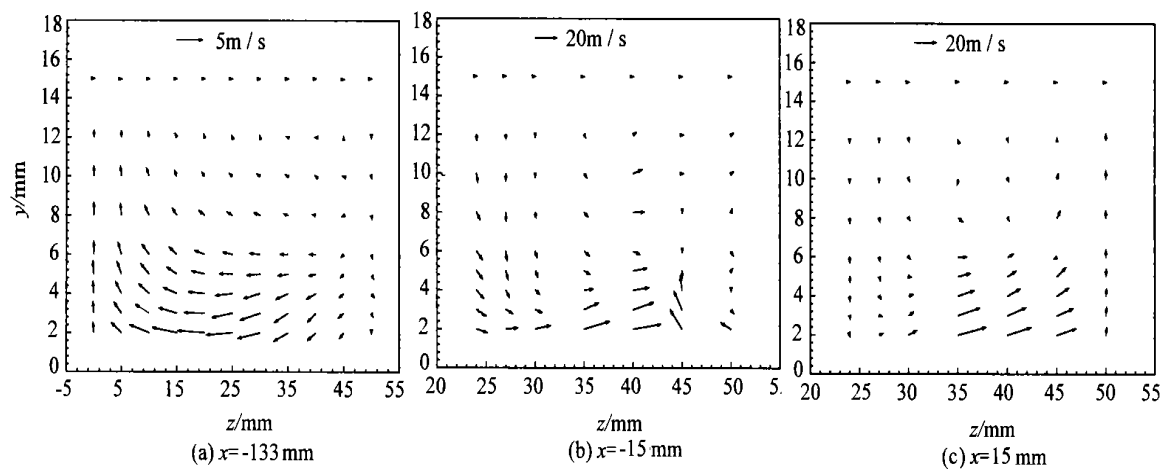


图5 二次流速度矢量分布

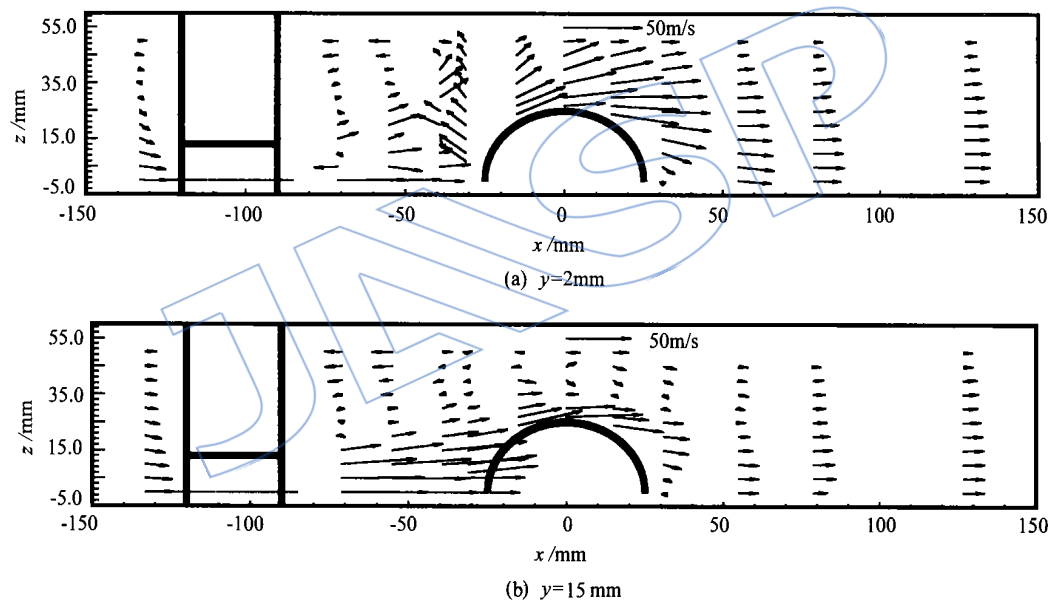


图6 带射流冲击的扰流排内不同高度上速度矢量分布(俯视图)

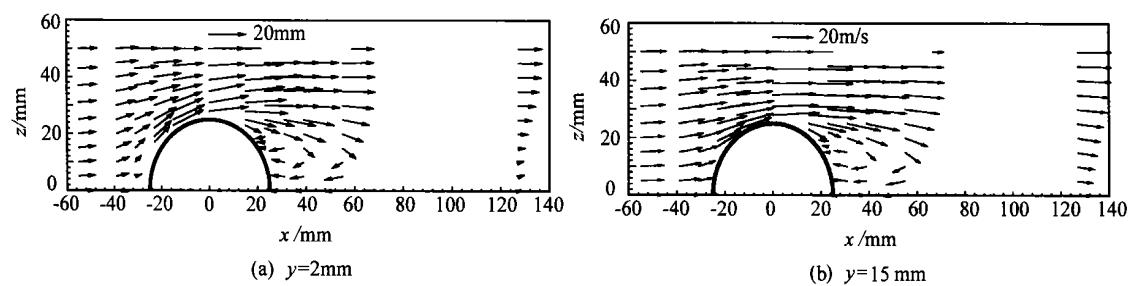


图7 无射流冲击的扰流柱排内不同高度上速度矢量分布(俯视图)

之间的通道内及下游附近区域, 靠近端面的截面上 ($y = 2\text{ mm}$) 的流速较离端面较远处 ($y = 15\text{ mm}$) 的流速大, 并与图3中的结果相一致。作者认为端面速度较大的原因在于: 射流出口速度不均

匀, 中心区域速度较大, 冲击柱面前缘后, 气流有向端面流动的趋势, 将射流中的高速气流带到了端壁附近。在扰流柱排内端面速度较大, 在高度方向 $y > 4 \text{ mm}$ 的区域速度很小, 而且 v_x 为负值, 说明在这个区域存在垂直方向的漩涡, 在端面附近垂直方向漩涡强度较大, 它是马蹄涡、分离涡和通道涡相互作用的结果。以上现象表明: 射流冲击不但可以增强扰流柱表面的换热, 对端壁换热的增强也有极其重要的贡献, 因此可以得出结论: 在涡轮叶片尾缘区内流通道中射流冲击和扰流柱排的组合方式是一种有效的冷却方式。

图7为无射流冲击时 ($D = 50 \text{ mm}$, $Re_\infty = 34,000$) 扰流柱排内不同高度位置 ($y = 2 \text{ mm}$, $y = 15 \text{ mm}$) 的速度矢量图。与图6比较可以发现: 无射流冲击时, 扰流柱表面的流动分离点在130°左右, 在扰流柱后形成一大片回流区, 并伴有较强的分离涡, 尾迹区较大, 其他区域流动较为平稳。在不同高度平面速度分布几乎相同, 并与图4中的结果一致。

4 结 论

(1) 带射流冲击和无射流冲击时单排短扰流柱通道内的速度场分布和漩涡分布规律有很大不同。受到射流冲击后, 扰流柱表面附近区域速度很大, 沿 z 向速度迅速降低, 侧向速度梯度较大, 在靠近扰流柱表面附近有一股向下流动的气流, 致使扰流柱排靠近端面附近区域有较大的速度。

(2) 在侧向压差作用下, 扰流柱通道内会形成通道涡, 在流通面积变化比较剧烈的截面上通道涡的影响表现更为明显, 但对下游尾迹区的影响不大。

(3) 由于端壁边界层效应, 在扰流柱通道内扰流柱根部可以观察到马蹄涡, 马蹄涡的尺度比通道涡小得多。

(4) 在扰流柱通道中心区域存在一大片低速区, 该区域流动十分复杂, 靠近端面附近有垂直漩涡的产生。射流冲击使扰流柱表面的流动分离点位置后移, 尾迹区大大减小。

(5) 射流冲击不但可以增强柱面的换热, 对扰流柱排通道中端壁附近的换热增强也有重大的贡献。射流冲击和扰流柱排的组合形式是涡轮叶片尾缘区内流通道中有效的冷却方式。

致谢 作者衷心感谢美国联合技术中心 (UTRC) 和普惠公司 (Pratt & Whitney) 对本项目的支持并允许发表此论文。

参考文献

- [1] Chyu M K. Heat Transfer and Pressure Drop for Short Pin Fin Arrays with Pin-Endwall Fillet [J]. Trans of ASME, 1990, 112: 926- 932.
- [2] Wang Z, Ireland P T, Jones T V. Detailed Heat Transfer Coefficient Measurements and Thermal Analysis at Engine Conditions of a Pedestal With Fillet Radii [J]. Trans of ASME, 1995, 117: 290- 297.
- [3] 苏红桢. 扰流柱排内流场和换热研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
- [4] 陈克诚编. 流体力学实验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [5] 盛森芝, 沈熊, 苏伟编著. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.

(责任编辑 杨再荣)