

间隙泄漏对半开式离心叶轮性能影响的 实验研究与分析^①

楚武利 刘志伟

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 通过实验研究, 得出了半开式离心叶轮间隙对效率及压力的影响和不同间隙下叶轮出口径向速度的变化规律。在间隙一定, 当流量从大向小变化时, 主流区从轮盘侧向轮盖侧移动, 有时在轮盘侧观测到明显的倒流现象。用动态热线风速仪对叶轮叶道出口的速度分布进行了集平均测量, 得出了不同流量下的速度分布。

主题词: 半开式离心叶轮⁺, 间隙测量, 流量, 实验

分类号: V232.4

EXPERIMENT STUDY ON EFFECT OF TIP CLEARANCE ON CENTRIFUGAL IMPELLER PERFORMANCE

Chu Wuli Liu Zhiwei

(Dept. of Aeroengine engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: Fluid loss caused by leaks through the impeller tip clearance was investigated for a centrifugal compressor. Operating conditions and clearance were varied independently during the experiment. It was found that the average compressor performance would be reduced by about 10% when the relative clearance was increased from 2.8% to 6.9%. The leak velocity in clearance was measured by hot wire. Moreover, the distribution of velocity at impeller exit was taken and the results show that the reverse flow occurs near hub side in small flow rate.

Subject terms: Unshrouded centrifugal impeller⁺, Clearance measurement, Flow rate, Experiment

1 引 言

半开式离心叶轮在叶片顶部与机壳的间隙, 会导致潜流损失, 影响叶道内的主流流动及二次流结构, 对压气机性能产生较大的影响。为此, 人们对半开式叶轮中的流动现象进行了大量的实验研究及理论预测。Pampreen^[1]收集了6种不同形式离心叶轮的数据, 分析发现不同形式叶轮效率下降与间隙之间的关系相当分散, 而且各个叶轮效率与间隙比之间关系变化的斜率不同。文献 [2, 3] 用实验方法研究了闭式及半开式叶轮的流动, 发现除大流量外, 小间隙下半开式叶轮的性能优于闭式叶轮的性能。文献 [4] 中尝试用 N-S 方程计算半开式叶轮间隙及叶轮中的流动, 得出了一些有益的结论。文献 [5] 推导了半开式离心叶轮间隙流动所产生的力及引起的损失, 建立了相应的压力损失及效率随时间变化的模型。本文在一台小型单级离

^① 收稿日期: 1998-07-08, 修回日期: 1998-12-03, 本课题系航空基金资助项目

心压气机实验台上进行了实验研究,通过测量不同间隙下离心压气机的性能,得出间隙相对大小对性能的影响。

2 实验装置及测量方法

采用进气实验方法,装置如图1。叶轮与轮盖间隙可通过改变支架上的垫片厚度来调节,为保证实验装置运行的安全性,实验时,最小间隙控制为1 mm。调节时,每次增加0.5 mm,最大间隙为2.5 mm。离心压气机转速为2 800 r/min,叶轮外径为200 mm,叶片数为14,叶轮为后弯型,单圆弧叶片。流量采用进口集流器方法测量,用压力扫描阀及数据采集系统对压力信号进行采集,功率的测量采用电测法,通过测量电机的输入功率及电机效率得出,采用尖劈型三孔探针测量叶轮出口平均径向速度分布,采用动态热线风速仪得出一个叶道出口的集平均径向速度分布。

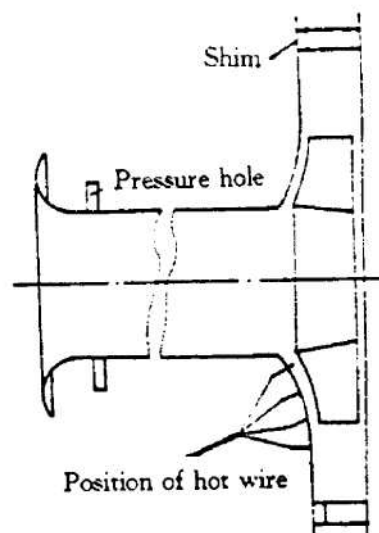


Fig. 1 Sketch of test device

3 实验结果及分析

3.1 间隙对总体性能的影响

测量不同间隙下压气机的流量、压力及耗功,并通过进气节流改变压气机的工作状态,计算出效率及压力与流量的关系。图2为各间隙下全压叶轮进出口的总压之差与流量间的关系,图3为效率与流量之间的关系。从图中可明显的看出,全压及效率均随间隙的增加而减小,大间隙下,间隙变化对全压及效率的影响很明显,当间隙进一步减小后,间隙对全压及效率的影响相对减小。如当相对间隙从6.9% (2.5 mm) 减小到5.5% (2.0 mm) 时,全压和效率分别下降11%和8%,而当相对间隙从4.2% (1.5 mm) 下降到2.8% (1.0 mm) 时,全压和效率分别下降2.5%和2%。

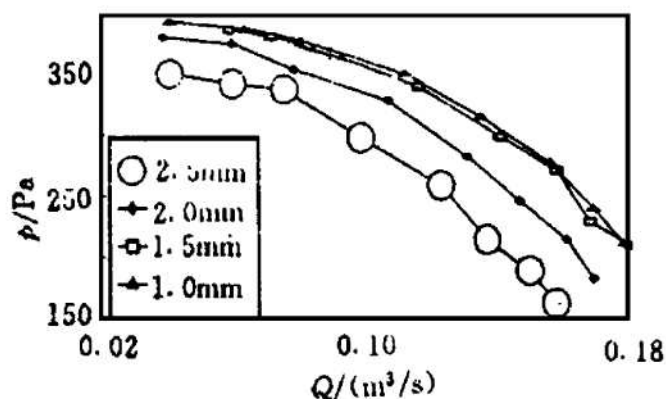


Fig. 2 Change of pressure due to tip clearance

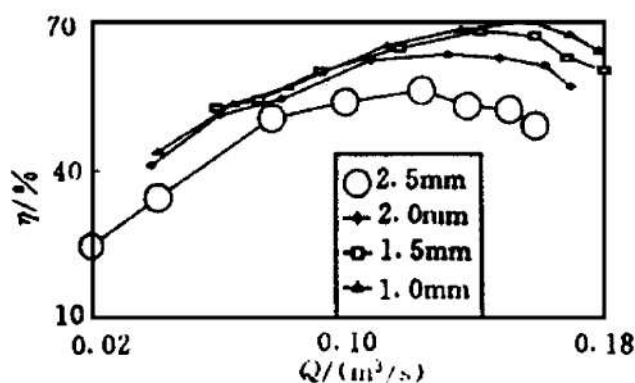


Fig. 3 Change of efficiency due to tip clearance

3.2 不同间隙下叶轮出口径向速度分布

在进气节气门位置一定时,不同间隙下用尖劈型三孔探针测量的叶轮出口径向速度分布见图4。该图的流量接近0.10 m³/s,横坐标为沿叶轮出口宽度方向,用距轮盖的轴向距离与叶轮出口宽度之比,纵坐标为径向速度与叶轮出口圆周速度之比。从图4可看出,在该流量下,径

向速度最大值靠近轮盘侧,当间隙增大时,径向速度减小,说明间隙增加后,吸气量有所下降,但间隙的增加并没有明显改变径向速度分布的趋势。同一间隙不同流量下径向速度分布见图5。从图5中可看出,大流量下径向速度分布的最大值在轮盘侧,当流量减小时,叶轮出口径向速度分布的最大值从轮盘侧向轮盖侧移动,当流量减小到某一值后,在轮盘侧测量到明显的倒流现象,如图5中 $Q=0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况。用烟气可视化在轮盘处进行观察,发现有明显的烟气回流,说明探针测量的倒流现象是正确的。

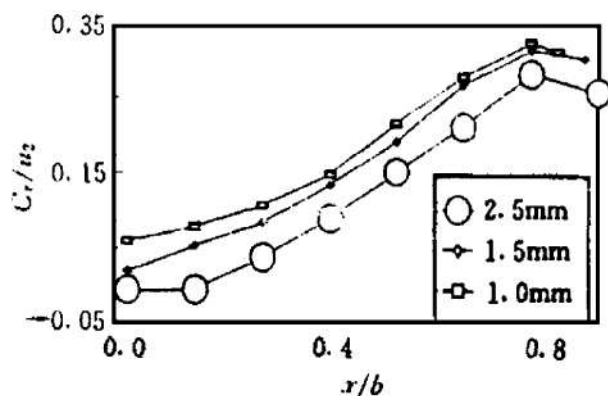


Fig. 4 Radial velocity distribution in different clearance

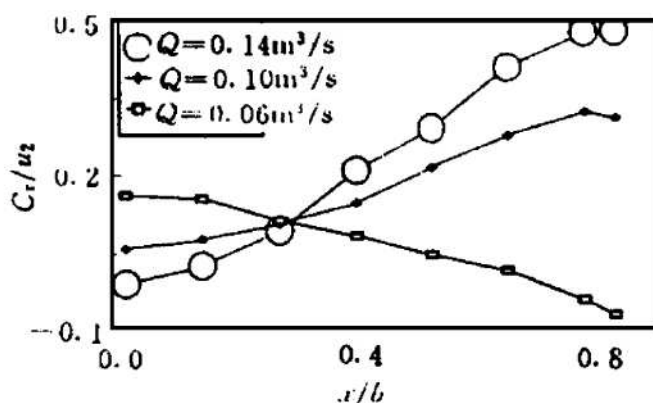


Fig. 5 Radial velocity distribution in different flow rate

3.3 半开式离心叶轮叶道出口流场的变化

对半开式离心叶轮叶道出口流场测量的测点布置见图6。将高频响的动态热线风速仪置于叶轮出口径向距离8 mm处,通过坐标架使探针在叶轮出口宽度方向移动。用外界信号触发,当叶轮叶片转至位置1时进行采集,采用多点采样法,每触发一次在叶轮叶道出口采20个点。为消除测量中的随机干扰信号,在每一个轴向位置采样100次,进行集平均处理,得出各点的参数。改变轴向位置测量,可得出整个叶轮通道出口的速度分布,并以等势图的形式给出。图7给出了一个完整的叶轮叶道出口径向速度分布,在四条边界线中,上线代表轮毂,下线代表轮盖,左边线代表叶片压力面,右边线代表叶片吸力面,图中的数据表示径向速度无因次量的大小,从图7中可知,大流量时 ($u_r/u_2=0.21$),主流区集中在轮盘侧压力面附近,离开压力面的距离约占一个通道的1/3,且沿轴向的速度梯度很大,随着流量的减小 ($u_r/u_2=0.15$),主流区向轮盖侧移动,而所在的周向位置基本不变,当流量系数进一步减小时 ($u_r/u_2=0.09$),径向速度在整个通道的分布基本趋于均匀,另外大流量下轮盖侧、压力面附近有一个低速区。

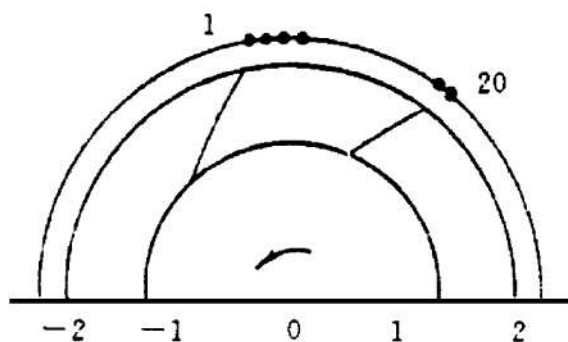


Fig. 6 The measure point at exit of impeller

4 结 论

(1) 半开式离心叶轮的壓力及效率随间隙的增加而减小,当相对间隙 t/b 从2.8%增加到6.9%,效率下降近10%,压力下降13%。但小间隙下,相对间隙对全压及效率的影响不如大

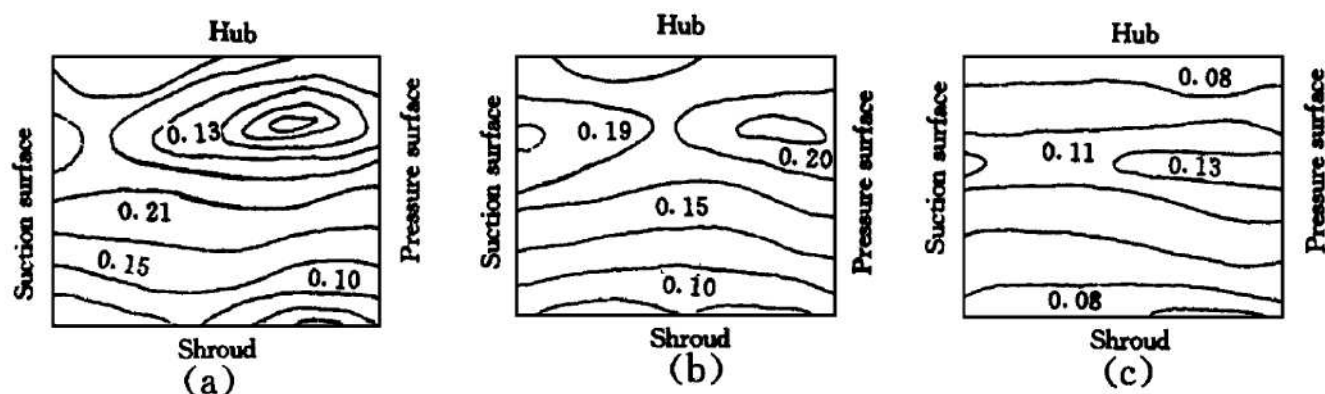


Fig. 7 The radial velocity distribution at exit of impeller

(a) $u_r/u_2=0.21$ (b) $u_r/u_2=0.15$ (c) $u_r/u_2=0.09$ (a) (b) (c)

间隙下显著, 当间隙从2.8%增加到4.2%时, 效率下降2%, 全压下降1.25%。

(2) 半开式离心叶轮出口的平均径向速度变化趋势为: 当节流位置一定时, 间隙增加, 则径向速度减小, 表明吸气量有所减小, 但径向速度的分布规律并不发生明显的变化。当间隙一定, 流量减小时, 最大径向速度分布从轮盘侧向轮盖侧移动, 当流量小于一定值时, 轮盘侧出现倒流。

(3) 从叶道出口的集平均速度分布可看出, 大流量下主流区集中在轮盘侧压力面附近, 且沿轴向的速度梯度很大; 随着流量的减小, 主流区向轮盖侧移动, 而所在周向位置基本不变。

参 考 文 献

- 1 Pampreen R C. Small turbomachinery compressor and fan aerodynamic. ASME Journal of Engineering for Power, 1973, 95 (7)
- 2 Harada H. Performance characteristics of shrouded and unshrouded impellers of a centrifugal compressor. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, 107 (4)
- 3 Shun Kang, Charles Hirsch. Influences of tip leakage flow in centrifugal compressor. 3rd International Symposium on Aerothermodynamics of Internal Flows, Beijing, 1996, 9
- 4 Engeda A, Rautenberg M. Comparisons of relative effect of tip clearance on centrifugal impellers. ASME 87-GT-11
- 5 楚武利, 刘志伟. 间隙对半开式离心叶轮性能影响的理论预测. 推进技术, 1999, 20 (1)