

# 热斑对涡轮二级静叶热负荷影响的实验和数值研究<sup>\*</sup>

闫朝<sup>1</sup>, 内田澄生<sup>2</sup>, 坂元康朗<sup>2</sup>, 徐建中<sup>1</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2. 三菱重工业株式会社高砂研究所, 日本 6768686)

**摘要:** 采用以氦气比拟热斑的实验方法和三维非定常数值计算研究了两级涡轮入口处的热斑对二级静叶通道的影响。结果发现, 热斑对二级静叶通道内的热负荷分布具有明显影响: 在径向的分布集中于50%叶高以下, 在叶栅进口和出口附近, 热量集中于下端壁, 并随径向高度增加减少; 在周向有明显不均匀性; 端壁二次流对热斑分布有很大影响。

**关键词:** 涡轮; 热斑<sup>+</sup>; 热载荷; 二次流; 实验; 数值仿真

**中图分类号:** V235.113      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2004) 06-0517-04

## Experimental and numerical investigation on the effect of hot streak on the 2nd vane in turbine

YAN Zhao<sup>1</sup>, UCHIDA S<sup>2</sup>, SAKAMOTO Y<sup>2</sup>, XU Jianzhong<sup>1</sup>

(1. Inst. of Engineering Thermophysics, Academia Sinica, Beijing 100080, China;

2. Takasago R&D Center of Mitsubishi Heavy Industry Ltd., Takasago Hyogo 6768686, Japan)

**Abstract:** Experiment with helium gas analogizing hot streak and a 3D unsteady numerical investigation were conducted about the effect of hot streak on the 2nd Vane in Two Stage Turbine. Results show that the hot streak has an obvious influence on the heat loading of the 2nd vane: (1) heat is focused on the zones less than 50% blade height in spanwise direction. Endwall is heated most heavily and the heat decreases with the height increasing near leading and trailing edges of the blades; (2) heat distribution is obvious uneven in pitchwise direction; (3) secondary flow on endwall is also an important factor varying the distribution of hot streak.

**Key words:** Turbine; Hot Streak<sup>+</sup>; Thermal load; Secondary flow; Experimentation; Numerical simulation

## 1 引言

当今燃气轮机的核心部件燃烧室, 因其内部燃料喷嘴以及火焰和气流组织结构的原因, 会造成燃烧室出口(即涡轮进口)温度场的不均匀分布, 其中的局部高温区域——热斑(Hot streak)对涡轮叶表的冲击严重影响着叶片的热负荷及寿命, 所以, 研究和优化热斑特征参数, 是减轻叶片热负荷强度、合理设计冷却方案和提高涡轮前温度的重要手段。国外对热斑的研究始于20世纪80年代, Dorney<sup>[1]</sup>, Saxer<sup>[2]</sup>, Shang<sup>[3]</sup>, Sondak<sup>[4]</sup>等人完成了大量的实验和数值模拟工作, 国内这方面的研究<sup>[5,6]</sup>才刚刚开始, 且仅限于数值模拟

方面。这些工作主要以第一级两排叶栅的热负荷为研究重点, 本文将通过实验和数值模拟的手段, 以某型高压涡轮两级叶栅为对象, 重点对二级静叶通道金属表面在热斑影响下的热负荷分布进行了分析。

## 2 实验设备

实验是在日本三菱重工高砂研究所的二级低速冷流回转涡轮实验台(Low Speed 2-stage Research Turbine test rig, 简称LSRT)上完成的。该实验台的主要工作介质为空气。需要说明的是, 真实燃气轮机内部热斑和涡轮入口导向叶片之间的相对位置(包括在周向和叶高方向)会受到具体的运转条件、燃烧室类型、

\* 收稿日期: 2003-11-20; 修订日期: 2004-04-20。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助(G1999022305); 国家自然科学基金资助项目(50376062)。

作者简介: 闫朝(1975—), 男, 博士生, 研究领域为叶轮机械非定常流动机理及CFD研究。E-mail: yzstp@sohu.com

旁路伐门开合等因素的制约而形成多种相对位置的组合,全面的实验研究是很困难的,因此本研究只选取了其中之一。具体地,实验中在涡轮入口前缘正前方、25%叶高处注入高纯度的氦气来“比拟”热斑,如图1,其中1C,2C分别代表一、二级静叶,1S,2S分别代表一、二级动叶。通过对下游通道中的氦气浓度的测量,可以判断热斑的影响范围和强度。此项研究目的是为了明确热斑对二级静叶的影响,所以,将重点测量二级静叶出口平面氦气的浓度。

Table 1 Operating Conditions

Rotating speed/ (r/min)	450
1C inlet stagnation pressure/ Pa	102925.227
1C inlet stagnation temperature/ °C	25
Meridional pitch angle/ (°)	0
Swirl angle/ (°)	0
2S outlet static pressure/ Pa	99101.227
1C inlet helium gas concentration/ ppm	5000

表1给出了实验装置的运行条件。实验装置整周均布的热斑数量和1C,1S,2C,2S排的叶片数分别为16,32,54,32,72。考虑到热斑的影响范围,为了节

约成本,实验中实际只有三股氦气从1C前缘的三个相邻通道注入,其余通道以近似条件的空气补充。测量集中在2C出口平面的一个扇形区域,范围如图2所示,径向2%~50%叶高,平均分5站,周向为0~200%栅距,即两个栅距,分9站,共45个测量点。

实验进行之前,对氦气到达2C出口处的扩散度,单点浓度测量时间,测量数据的重复性和周期性(0和200%栅距处应该具有周期性)进行检测,以确保实验设备和测量的准确可信。

### 3 实验结果和分析

对2C出口平面的氦气浓度的测量结果如图3,图中的5条曲线代表浓度在不同叶高处沿周向的分布情况。图4是根据图3数据绘出的等值线图。可以看到,对应不同的叶高位置,氦气浓度的分布沿周向是不均匀的,在0~50%栅距位置左右处于一个较高的水平,而在150%栅距处则处于低谷。随着高度的增加,这种趋势逐渐变为平坦,同时,氦气浓度随高度增加在整体上呈现下降趋势,最后在50%叶高处基本消失。

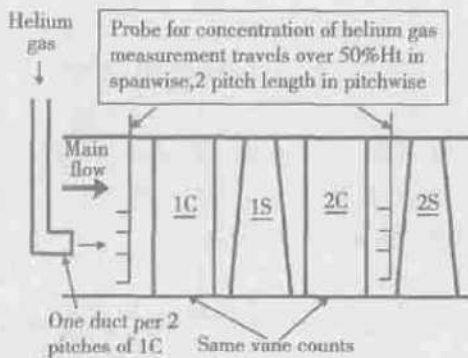


Fig.1 Schematic of experiment in LSRT

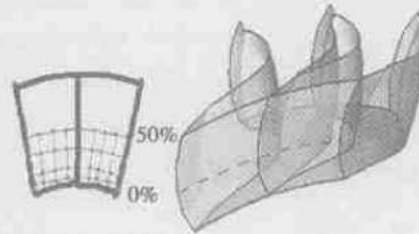


Fig.2 Measuring points coordinate at 2C exit

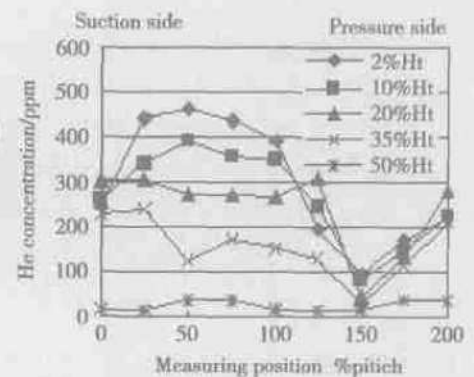


Fig.3 He concentration measured at 2C exit

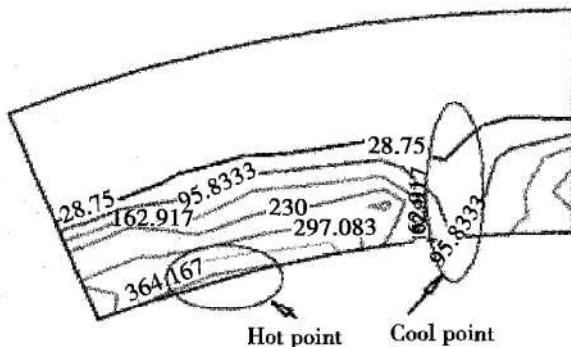


Fig.4 Contours of He concentration at 2C exit (unit: ppm)

以上现象说明,入口处的热斑流过1+1/2级涡轮

叶栅通道以后,扩散到周向的所有位置,但仍具有不均匀性,根部尤为明显。在径向方向,热量具有向根部“沉积”的趋势,在根部位置达到最大,而在50%叶高处已减弱到可以忽略的程度。这些都表明,左侧(50%栅距)二级静叶叶表承受着较高的热负荷,且以叶根位置以及底部端壁最为严重。但随着高度增加,热斑的影响逐渐减弱,到达50%叶高以后,这种影响基本消失。

### 4 计算过程

为了正确模拟热斑在整个两级涡轮通道中的分布,非定常计算变成唯一的选择(定常计算所使用的

掺混界面模型会把温度的周向不均匀分布“抹平”)。计算对象和实验一致,如图 5 所示,其中右侧入口端的深色方块代表热斑。为了减少非定常计算的工作量,这里对热斑和叶片数比进行了约化,具体为: Hot streak: 1C: 1S: 2C: 2S= 1: 2: 4: 2: 4。计算程序使用的是剑桥大学 Whittle 实验室 Denton 教授开发的 UNSTREST,采用 H 型网格,时间推进和双时间步法求解雷诺平均的 N-S 方程,以经验湍流模型封闭方程组,多重网格和当地时间步长方法加速收敛,该格式在空间和时间方向均具有二阶精度。

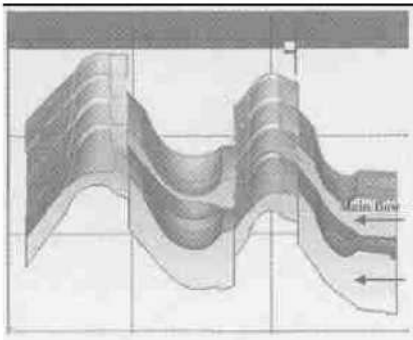


Fig. 5 Scaled geometries in computation

表 2 详细列出了非定常计算时各叶排通道所使用的网格数量,总网格数为 3,092,880。表 3 为计算条件,热斑以高于周围 40 度的区域代替,具体如图 6 所示。为使气体具有可压缩性以便于计算,动叶转速比实验中加快了一倍,为了同时保持各排相对气流角不变,对计算出口静压作出了相应的调整。计算是在 Dell Workstation PWS340 工作站型计算机上进行的,总耗时为一周。

Table 2 Mesh distribution in one passage

Blade	Streamwise	Pitchwise	Spanwise
1C	136	46	49
1S	127	37	49
2C	127	46	49
2S	136	37	49

Table 3 Computational conditions

Main flow	
Inlet total pressure/ Pa	101270
Inlet total temperature/ K	297
Flow angle/°	0
Exit static pressure/ Pa)	86941
Hot streak	
The highest stagnation temperature/ K	337
Rotating speed	
Rotating speed/ ( r/min)	900

## 5 计算结果与分析

图 7 比较了实验和非定常计算在一个周期内的

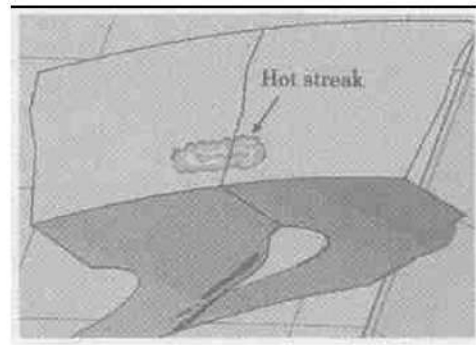


Fig. 6 Stagnation temperature contours at 1C inlet viewed from downstream

平均结果。图中位于上方的实验结果是浓度分布,下方则是温度分布情况。可以看到,实验和计算所得到的热斑分布趋势是一致的,沿叶高方向均不超过 50% 叶高,在周向方向,高温区都是位于左侧下端壁。不同的是,计算所得的温度场在周向没有像实验扩散的那样均匀,右下端的低温区域较实验宽,这可能是由于氦气分子在空气中的扩散(实验)和相同都是空气的高低温度区域之间的扩散(计算)还是存在一定程度的差别造成的。但总的来说,数值计算基本可信,可用于定性研究热斑的散布趋势。

需要说明的是,以下图例 8 至 10 均为二级静叶通道中的流动在一个周期内平均的非定常计算结果,温度单位为 K。从图 8 可以看到,当热斑进入二级静叶入口时,来自上游的热斑在周向和径向的扩散程度都较小。径向的扩散主要指向叶根,叶尖方向则显得很微弱,不超过 45% 叶高。在周向,热斑的影响范围接近一个栅距,且其位置偏向图 8 中的一号叶片,造成叶表较大的热负荷,二号叶片则基本不受影响。

一号叶片受热斑影响严重,图 9 展示了其叶表压力面和吸力面上的温度分布。图中所绘区域从左到右依次为叶片前缘延伸段、叶片实体和尾缘计算域的延伸段。从图中容易发现,热斑对压力面的影响很小,仅在前缘下侧有一个很小的高温区域。热斑在吸力面有所不同,影响范围从叶栅前缘一直延伸到尾缘,高温区的径向范围在端壁二次流的作用下沿流向逐渐变窄,向高处(约 1/4 叶高)集中。但是,当热斑从尾缘流出以后,又会迅速降到下端壁形成高温区,形成“沉积”。

图 10 展示了下端壁的温度分布,可以看到,热斑位于一号叶片的吸力面的上方(周向),在端壁二次流的作用下向一号叶片吸力面靠近并集中,到达约 2/3 叶片轴向弦长处消失,正如在图 9 中看到的,同样是

二次流的作用,热斑在此处已全部迁移到高处。综合图9和10可以发现,一号叶片吸力面的热载荷最强,

且有向尾缘集中的趋势,但是在对流和传导的影响下,“集中”的效果并不明显。

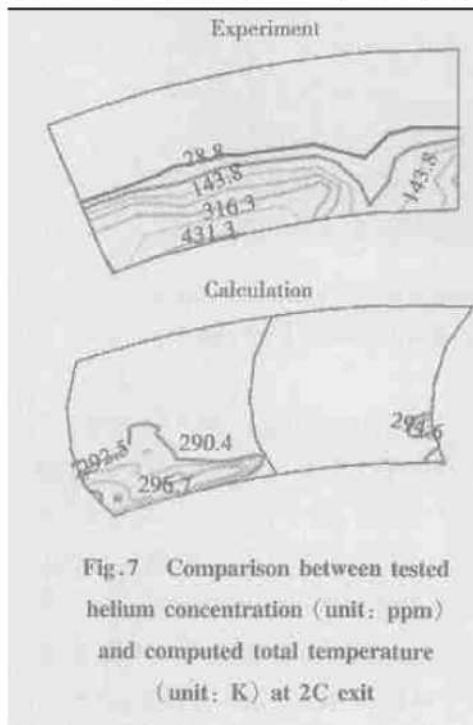


Fig.7 Comparison between tested helium concentration (unit: ppm) and computed total temperature (unit: K) at 2C exit

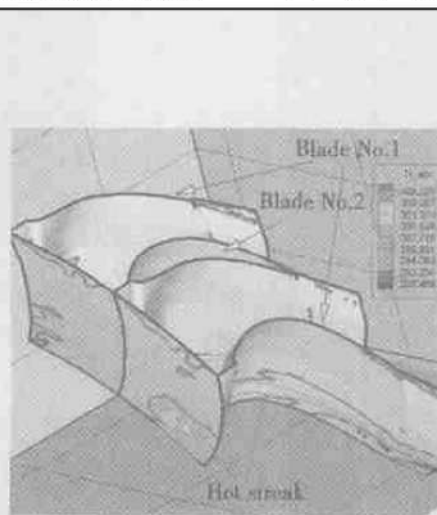


Fig.8 Stagnation temperature contours in 2C

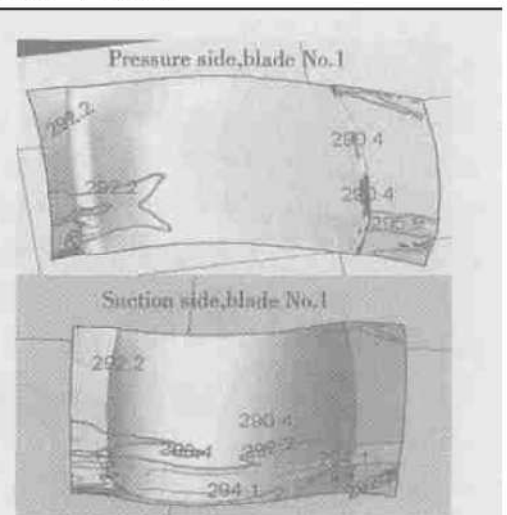


Fig.9 Temperature distribution on pressure & suction sides of 2C blade No.1

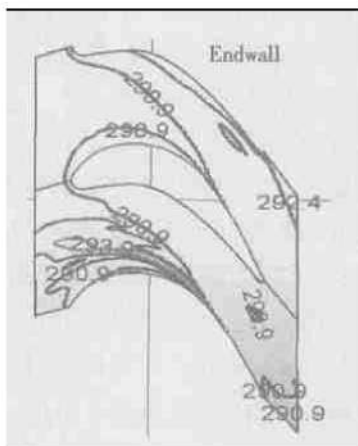


Fig.10 Temperature distribution on endwall

## 6 结论

本文通过实验和数值计算的方法研究了二级涡轮入口处的热斑对二级静叶通道的影响。结果发现:

(1) 在端壁二次流的作用下,热斑有种“沉积”的趋势。二级静叶通道中,其在径向的分布集中于50%叶高以下,在叶栅进口和出口附近,热量集中于下端壁,并随径向高度增加减少;

(2) 热斑在二级静叶入口处靠近一号叶片,对其影响最大。一号叶片吸力面的热负荷最大,遍及整个流向区域,径向则不超过50%叶高;

(3) 端壁二次流对热斑分布有很大影响。下端壁处,热斑在端壁二次流的作用下向吸力面集中,并在2/3叶片轴向弦长处全部迁移到了1/4叶高处。

## 参考文献:

- [1] Dorney, Daniel J, Davis, et al. Unsteady analysis of hot streak migration in a turbine stage [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(2): 520~ 529.
- [2] Saxer, Andre P. Numerical analysis of 3-D unsteady hot streak migration and shock interaction in a turbine stage [C]. *ASME Paper*, 94-GT-76: 1-7, 1994.
- [3] Shang, Tonghuo, Epstein, et al. Analysis of hot streak effects on turbine rotor heat load [C]. *ASME Paper*, 96-GT-118: 13, 1996.
- [4] Sondak D L, Gupta V, Orlikov P D, et al. Effects of blade count on linearized and nonlinear hot streak clocking simulations [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(6): 1273 ~ 1279.
- [5] 董素艳, 刘松龄, 朱惠人. 进口热斑对涡轮级影响的非定常数值模拟 [J]. *航空动力学报*, 2001, 16(3).
- [6] 季路成, 杨吉民, 徐建中. 关于1+1对转涡轮中热痕现象的研究 [J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(6).

(编辑: 梅 瑛)