

各型封严蓖齿的换热研究

西北工业大学 张 丽* 刘松龄 游绍坤 许都纯

【摘要】 本文通过实验测量了不同齿间隙和不同来流雷诺数直通式直齿、直通式斜齿以及台阶式直齿的换热情况,并从机理上分析了结构和流动参数对换热的影响规律。为便于实际应用,本文还根据实验数据给出了相应的关系式。

主题词: 齿形 换热 实验
分类号: TK124

自由词: 封严蓖齿

1 前 言

文献 [1] 通过计算和实验研究了台阶齿中的换热情况以及来流雷诺数和齿距齿隙比对换热的影响。文献 [2] 对于高旋转情况下蓖齿腔中的换热进行了研究。文献 [3] 测量了直通式直齿齿腔的流场和顶板的对流换热系数。

本文在不转动的条件下,详细测量了在不同的齿间隙和不同的来流雷诺数情况下直通式直齿、直通式斜齿、台阶式直齿顶板以及直通式直齿齿面的局部换热系数,通过对实验结果的整理和分析,总结出了雷诺数和齿距齿隙比对换热的影响规律,为了便于实际应用,还得出相应的经验公式。

2 实验装置和测量方法

本实验在自行设计和建造的矩形通道吸气式内流传热风洞中进行,风洞由进口段、均匀段、实验段、恢复段和收缩段五部分组成,实验段如图 1 所示,进口截面为 $600\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,实验蓖齿的支座可以在实验段内上下移动以调节齿顶间隙。顶盖为绝缘胶木板,蓖齿用薄的胶合木板胶接成,蓖齿支座与风洞其余部分均用有机玻璃胶合而成。

在蓖齿的中段和顶盖的中段贴有宽 90 mm 厚 0.04 mm 的 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 加热钢带,在钢带的背面沿中心线焊有直径为 0.1 mm 的镍铬—镍硅热电偶用以测量换热面上各处的温度,为减少导热损失,在顶盖外侧和蓖齿内敷设有孔硬泡沫塑料保温层。

实验用的直通式直齿、斜齿和台阶齿的基本结构

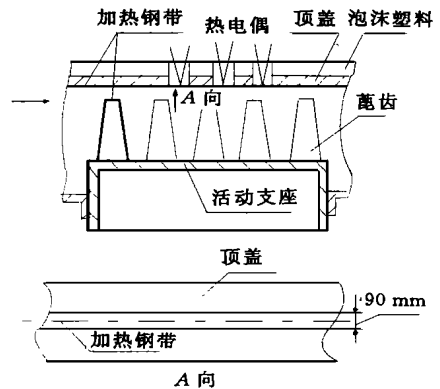


图 1 实验段基本结构

如图 2。蓖齿均为木质, 直通式直齿的齿距 B 为 200 mm, 共 5 个齿, 齿顶宽 T 为 20 mm, 齿高 H 为 200 mm。直通式斜齿的齿距 B 为 200 mm, 共 4 个齿, 齿顶宽 T 为 20 mm, 齿高 H 为 200 mm, 迎风面倾角 α 为 15° , 背风面倾角 β 为 30° 。台阶齿的齿距 B 为 100 mm, 共 4 个齿, 齿顶宽 T 为 10 mm, 齿高 H 为 100 mm。三种蓖齿的齿隙 C 可进行调节。

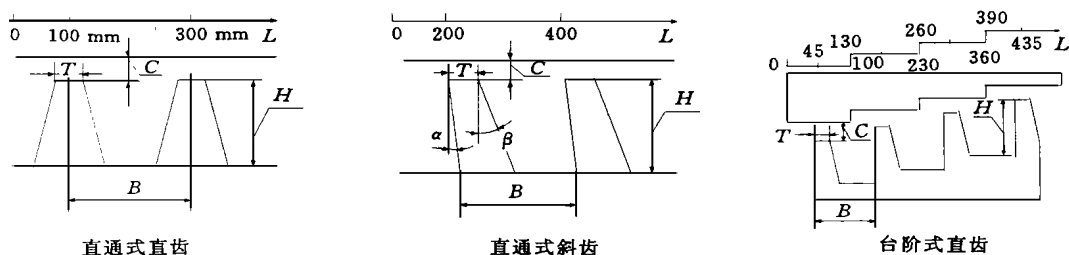


图 2 蓖齿基本结构

对流换热系数 α 定义为: $\alpha = q / (t_{wi} - t_f)$ 。式中 q 为热流密度, t_{wi} 为各测点壁面温度, t_f 为气流进口温度。

3 实验结果及分析

3.1 直通式直齿顶面及齿面的换热

本文中雷诺数定义为:

$$Re = V d_e / \nu$$

式中: V 为齿顶处的平均流速, ν 为运动粘度, d_e 为定型尺寸: $d_e = 4f / U$ 。式中: f 为齿尖处气流通流面积, U 为齿尖处气流通道周长。

本文测量了 $Re = 10000 \sim 60000$, $B/C = 5, 10, 20$ 情况下的换热系数, 图 3 表示 $B/C = 10$ 时直通式直齿顶面的换热情况。横坐标 L 为测量点距实验段入口距离 (如图 2 所示)。从图中可以看出, 进入蓖齿之前换热系数较小, 在接近 100 mm 处换热系数增加, 在 100 mm 处达到第一个峰值, 随后换热系数逐渐下降, 在 160 mm 左右达到最小值以后又逐渐回升。在 300 mm 处达到第二个峰值, 300 mm 以后换热系数变化平缓。距入口段 100 mm 处为第一齿顶相应位置, 由于节流作用气流在此收缩流速增大

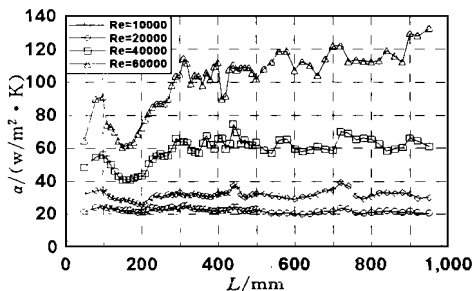


图 3 直通式直齿顶面的换热系数分布

使换热加强, 换热系数达最大值。在 100 mm 与 300 mm 之间为第一蓖齿腔, 根据文献 [3] 的研究结果, 从第一齿隙冲出的射流在齿腔中部存在气体分离现象, 在顶板上形成低速回流区, 使换热系数降低, 故在第一齿腔中部产生一个波谷, 当气体流经第二齿顶时, 由于同样原因使换热系数达到第二个最大值。在以后从间隙中流出的气体基本上以射流形式沿顶板流动, 不再分离, 换热系数变化平缓。

图 4 (a) 为 $B/C = 10$ 时第一齿迎风面的换热系数变化情况。横坐标 L 为蓖齿迎风面上测量点与迎风面齿底的距离。从图中可以看出, 在第一齿的迎风面上从齿底到齿顶, 换热系数先从小逐渐增大, 在中下部达到最大值后又有所降低, 接近齿顶时又逐渐增大, 在齿顶达到

最大值。从流动情况来看,在第一齿底部为流动死区,换热情况差,在齿中下部,由于有气流冲击使换热增强,换热系数较大,这种现象在低雷诺数下由于流速小不明显,而在高雷诺数时较明显。到了齿上部,由于气流逐渐收缩进入齿顶,流速加快使换热系数升高。

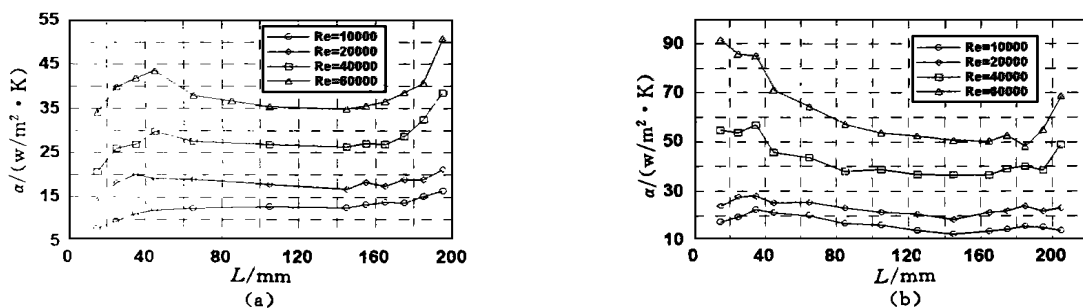


图 4 直通式直齿第一齿迎风面、背风面换热系数分布

$B/C = 10$ 时第一齿背风面的换热如图 4 (b) 所示。横坐标 L 为齿背风面上测量点与背风面齿底的距离。雷诺数在 2×10^4 以下时, 换热系数沿齿高变化不大, 在近齿根区域换热略有增强。雷诺数大于 2×10^4 以后, 齿根和齿尖的换热都明显增强。

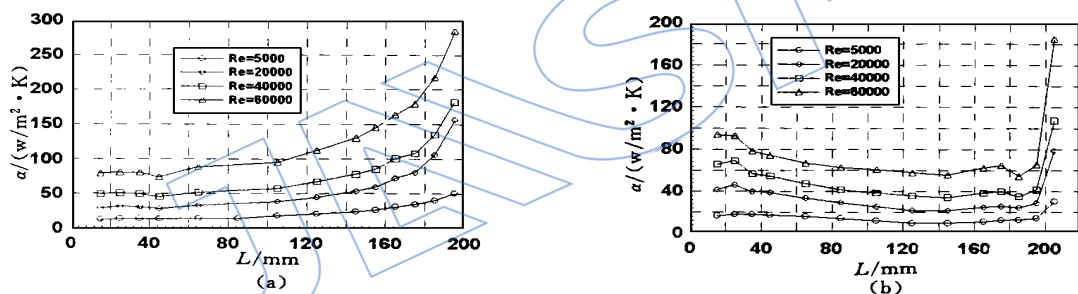


图 5 直通式直齿第二齿迎风面、背风面换热系数分布

图 5 (a) 和图 5 (b) 为 $B/C = 10$ 时第二齿迎风面和背风面的换热系数分布图。换热系数的变化规律与第一齿基本类似, 只是在迎风面的中下部没有出现峰值, 齿尖区换热系数的增大幅度较第一齿明显得多。在相同的雷诺数下, 迎风面的换热系数较第一个齿大, 背风面则和第一个齿差不多。出现这种情况的原因可能是由于迎风面受到第一个齿尖流出的高速气流的冲刷之故。

图 6 及图 7 (a) 和图 7 (b) 分别为直通式直齿顶面和第一齿的迎风面和背风面的平均 Nu 数随 Re 数和齿距齿宽比 B/C 的变化图。 Nu 数定义为: $Nu = \alpha d_e / \lambda$ 式中: α 为对流换热系数, λ 为空气导热系数。可以看出, Re 数增加则 Nu 数增加, B/C 增加则 Nu 数下降 (但换热系数 α 提高)。从中可得出 Nu 数随 Re 数和 B/C 变化的经验公式: $Nu = K Re^m Pr^{0.4} (B/C)^n$ 。其中 K , m 和 n 的取值见表 1。

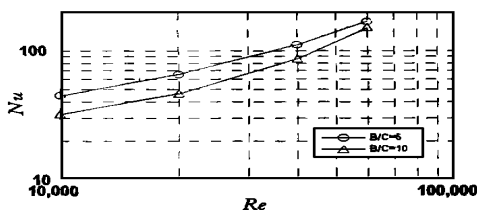


图 6 直通式直齿顶面平均 Nu 数随 Re 的变化

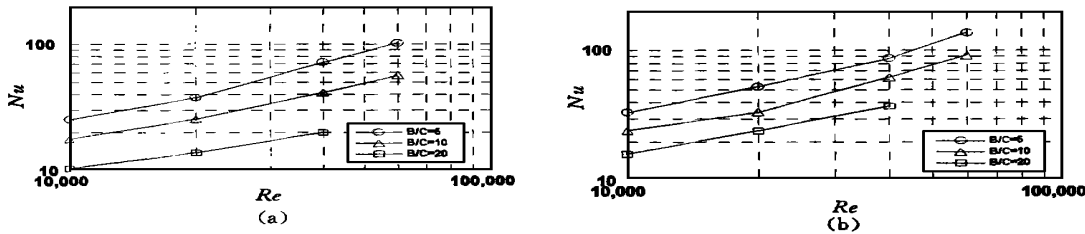


图 7 直通式直齿第一齿迎风面、背风面平均 Nu 数随 Re 数的变化

3.2 直通式斜齿顶面的换热

图 8 表示 $B/C=10$ 时直通式斜齿的局部换热系数沿顶面的变化。横坐标 L 为测量点距

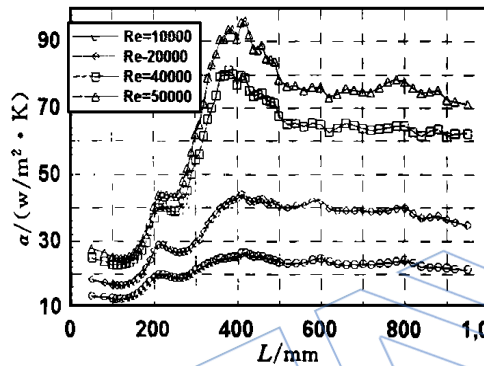


图 8 直通式斜齿顶面换热系数分布

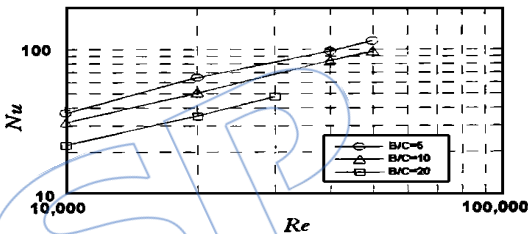


图 9 直通式斜齿顶面平均 Nu 数随 Re 数的变化

实验段入口距离(如图 2 所示)。与直齿基本类似,在第一齿顶(200 mm 处)达到第一个最大值后,在第一齿腔中换热稍有下降,下降幅度较直齿为小。到第二齿顶(400 mm 处)达到第二个最大值,略有下降以后趋向平坦。由于斜齿的结构特点,使齿腔内中部到前下部排列着 3 个旋涡^[4],其尺度差别较小,齿腔后上部还有一小涡周期性地出现,与直齿相比旋涡数量增加,射流与涡流之间的质量交换增强,使斜齿顶面的换热系数略高于直齿。

图 9 为斜齿顶面平均 Nu 数随 Re 数和齿距齿隙比 B/C 的变化图。并且得出同样形式的经验公式,系数取值见表 1。

表 1

	直通式直齿 顶 面	直齿第一齿 迎风面	直齿第一齿 背风面	直齿第二齿 迎风面	直齿第二齿 背风面	直通式斜齿 顶 面	台阶式直齿 顶 面
K	0.022	0.135	0.09	0.74	0.51	0.13	0.337
m	0.890	0.700	0.74	0.62	0.59	0.70	0.720
n	- 0.4	- 0.65	- 0.5	- 0.65	- 0.5	- 0.37	- 0.75
$Re (\times 10^4)$	1~ 6	1~ 6	1~ 6	0.5~ 6	0.5~ 6	1~ 5	1~ 5
B/C	5~ 10	5~ 10	5~ 10	5~ 20	5~ 20	5~ 20	5~ 10

3.3 台阶式直齿顶面的换热

图 10 为 $B/C=10$ 时台阶式直齿顶面上换热系数的变化图。横坐标 L 为沿台阶齿顶面的

适体坐标 (如图 2 所示)。换热系数的最大值出现在相对应于各个齿顶的位置, 而在每个台阶

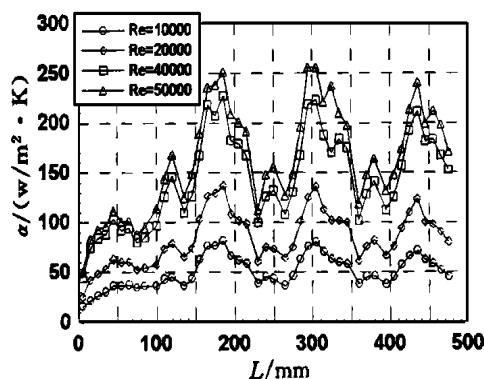


图 10 台阶式直齿顶面换热系数分布

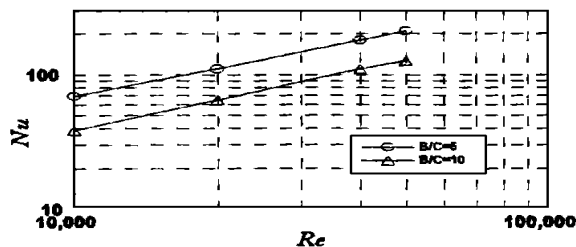


图 11 台阶式直齿顶面平均 Nu 数随 Re 数的变化

处换热系数达最小值。与直通式蓖齿不同, 换热系数在整个顶面呈周期性变化。齿顶位置换热系数达最大值是由于节流作用使此处流速加快, 换热增强, 而在每个台阶位置, 前一个齿顶流过的射流在

此脱离, 使换热减弱。这种换热系数沿顶面的变化规律与文献 [1] 中的测量结果相同。

台阶式蓖齿与直通式蓖齿相比, 由于台阶的存在改变了主流方向, 在台阶处形成脱流和旋涡, 使得台阶齿的换热系数高于直通齿的换热系数。

图 11 表示台阶式直齿顶面的平均 Nu 数随 Re 数和齿距齿隙比 B/C 的变化情况, 得出的经验公式中系数取值见表 1。与文献 [1] 中所得的经验公式基本类似, 指数 m 较文献 [1] 中的稍大, 可能是由于 Re 数的范围不同所致。

4 结 论

(1) 直通式蓖齿顶面换热测量结果表明, 在第一齿腔中局部换热系数较低, 在第二齿顶达到峰值后变化平坦。(2) 台阶齿顶面的最大换热系数出现在齿顶对应位置, 而最小值出现在台阶位置, 换热系数沿齿顶呈周期性变化。台阶齿的换热系数高于直通齿的换热系数。(3) 齿顶的节流对封严蓖齿内的换热有重要影响。

参 考 文 献

- 1 Wittig S, et al Heat Transfer in Stepped Labyrinth Seals Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1988, 101: 63- 69
- 2 Waschke W, et al Influence of High Rotational Speeds on The Heat Transfer and Discharge Coefficients in Labyrinth Seals The American Society of Mechanical Engineers 90- GT- 330
- 3 黄晓光 封严蓖齿内部流动和换热的实验研究: [硕士论文] 西北工业大学, 1997
- 4 吴丁毅 直通式蓖齿内部流场显示研究 流体机械, 1997, 25 (2): 11- 15

(责任编辑 杨再荣)

tion can be realized by connecting nodes in different components. A 3- shaft gas turbine engine's dynamic performance is simulated using an innovative gas path calculation method, the plenum algorithm. The extendability of the model is fully verified.

Key Words Gas turbines Simulation Models

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN LABYRINTH SEALS

Zhang Li, Liu Songling, You Shaokun, Xu Duchun

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

ABSTRACT Heat transfer coefficients around labyrinth are the necessary boundary conditions and important parameters for the thermal analysis of construction in aircraft engines. Heat transfer experiments for straight- through conventional labyrinth, straight- through slant labyrinth and stepped conventional labyrinth are conducted under the conditions of different Reynolds numbers and gap widths. Effects of geometric and flow parameters on the heat transfer are considered physically. For the convenience of practical application, the relations are derived from the experimental data.

Key Words Labyrinth seals Tooth forms Heat transfer Experiments

LOCAL HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS OF A ROTATING CAVITY WITH AN AXIAL FRINGE INLET AND A RADIAL OUTLET

Ding Shuiting, Tao Zhi, Xu Guoqiang, Qiu Xuguang

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A turbine cooling configuration of an aero- engine was simplified into a rotating cavity with an axial fringe inlet and a radial outlet. The influences of rotating Reynolds number, cooling air Reynolds number and Grashoff number on the local heat transfer and flow characteristics were investigated experimentally. The results indicated that the local heat transfer coefficient on the edge of main disk rapidly increases with the increase of cooling air Reynolds number and rotating Reynolds number. The local heat transfer coefficient becomes negative near the center of the disk. The flow friction coefficient increases with the increase of the cooling air Reynolds number and decreases with the rotating Reynolds number.

Key Words Swirling Discs Heat transfer

AN EXPERIMENTAL STUDY ON OVERALL COOLING EFFECTIVENESS OF INCLINED MULTIHOLE PLATES

Li Bin and Hu Zhengyi (Gas Turbine Establishment, Jiangyou 610500)

Liu Yuzheng and Liu Gaoen

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The overall cooling effectiveness of the inclined multihole plates