

带 60°肋和出流孔的矩形通道端壁换热特性研究

张宗卫, 朱惠人, 杜小琴, 郭涛
(西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 根据相似理论放大的模型, 采用热色液晶瞬态测量技术研究带有 60°肋和单排溢流孔的内流通道的换热特性, 分析主流雷诺数和出流比对壁面对流换热的影响规律. 矩形内流通道进口雷诺数变化范围是 20 000~80 000, 通道出流比变化范围是 0~0.6. 实验结果表明: 出流作用使出流孔附近区域的换热得到了强化; 主流雷诺数一定时, 随出流比的提高, 壁面平均换热系数和增强系数都先略微增大后逐渐减小; 出流比一定时, 随雷诺数的增加, 端壁平均换热系数基本呈线性增加, 而换热增强系数则减小.

关键词: 热色液晶; 出流孔; 60°肋; 换热系数; 内流通道

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0116-04

Investigations of Endwall Heat Transfer in the Rectangular Passage with 60-Degree Ribs and Suction Holes

ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, DU Xiaoqin, GUO Tao

(College of Propulsion and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Measurements of endwall heat transfer in a rectangular passage with 60-degree ribs and suction holes were conducted by using the transient thermochromic liquid crystal technique. The effects of Reynolds number and suction ratios on the heat transfer were investigated under the conditions of main-flow Reynolds number 20 000-80 000 and suction ratio 0-0.6. Our results show that heat transfer is enhanced near suction holes. The average heat transfer coefficient and the enhancement factor rose slightly first and then decreased with the increase in the suction ratio at a given Reynolds number. At a given suction ratio, the average heat transfer coefficient increased linearly and the enhancement factor decreased with the increase in Reynolds number.

Keywords: thermochromic liquid crystal; suction hole; 60-degree rib; heat transfer coefficient; internal passage

目前, 涡轮燃气进口温度已经远远高于涡轮材料的耐热极限温度, 所以为了使涡轮叶片安全工作, 必须采用有效的冷却结构对其冷却. 在内冷通道壁面布置扰流肋和出流孔是涡轮叶片常用冷却结构之一. 文献[1-2]分别研究了内冷通道里肋高、肋宽、肋角度等几何因素对壁面流动特性的影响; 文献[3-4]研究了带气膜孔内冷通道的换热特性, 发现真实涡轮叶片内冷通道往往是肋和气膜孔同时存在; 文献[5-6]研究了存在冷却工质抽出情况时, 由 90°直肋

引起的传热强化. 本文采用液晶瞬态技术, 研究同时具有 60°斜肋和单排出流孔的壁面换热情况. 液晶测温技术与传统热电偶测温方法^[1-4]相比, 最大的优点是改点测量为面测量, 可以得到被测表面全表面的温度场, 并且对流动不会产生影响. 本文通过实验研究了不同出流雷诺数和侧向出流比对带 60°斜肋和单排出流孔端壁表面换热的影响, 得到了可用于工程设计等实践应用的数据.

1 实验装置及测试方法

图1为实验系统示意图.压气机将空气压进储气罐,储气罐中气流流过前稳定箱,经快速加热器加热后流进实验段通道,一部分由实验段出流孔流出,一部分经后稳定箱流出.在实验段前后使用阀门和孔板流量计来调节和测量实验段进出口气体流量.

图2为实验段示意图.实验通道使用透明有机玻璃制作,截面高宽比为1,左、右壁面光滑,上、下两壁分别错排布置14根和15根肋.肋平行排布,与通道中心线夹角 α 为60°.下壁面肋与肋中间位置开有出流孔,共计14个出流孔(15根肋).肋距 P 为70 mm,其与通道当量直径 D 之比为1,孔间距与 D 之比为1.出流孔孔径 d 为7 mm,肋距与肋宽之比 P/e 为10,肋高与肋宽之比 I/e 为1.

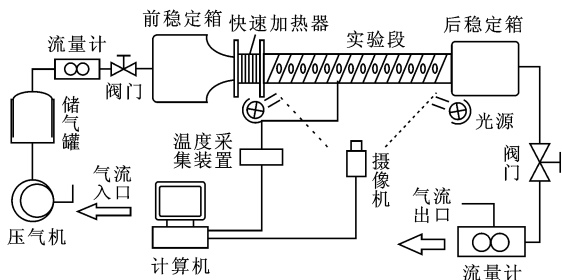


图1 实验系统示意图



图2 实验段示意图

本文实验采用热色液晶瞬态测量技术对带肋和出流孔的壁面进行全表面换热系数测量.热色液晶瞬态测量技术在国内外已发展得较为成熟,并有广泛的应用,文献[6]对其原理和方法都做了详细的介绍,这里不再赘述.

2 实验结果及分析

本文研究中的一些主要参数定义如下.

出流比

$$S_r = (m_{in} - m_{out}) / m_{in} \quad (1)$$

式中: m_{in} 、 m_{out} 分别为内流通进、出口质量流量.

入口雷诺数 $Re = ul/v$,在此处可以表示为

$$Re = \frac{(m_{in}/A_c)D}{\mu} \quad (2)$$

式中: μ 为动力黏度; A_c 为通道入口的横截面积.

局部换热系数

$$h_i = q_w / (T_{aw} - T_w) \quad (3)$$

式中: q_w 为壁面局部对流热流; T_{aw} 为绝热壁温; T_w 为壁面局部温度.

全表面平均换热系数

$$\bar{h} = \sum h_i s_i / \sum s_i \quad (4)$$

式中: s_i 是 h_i 对应的局部壁面面积.

全表面平均努塞尔数

$$\overline{Nu} = \bar{h}d/\lambda \quad (5)$$

式中: λ 为空气的导热系数.

2.1 端壁表面换热系数云图

图3给出了不同工况下壁面表面换热系数的分布云图.图3a、3b分别是 Re 为60 000、 S_r 为0.3的带直肋和60°斜肋的壁面换热系数云图.从图中可以看出,当肋为60°斜肋时,换热比直肋强.这是因为斜置肋片引起的二次流增加了肋的扰流作用,所以斜肋比直肋更有利于增强换热.

图3c是 Re 为60 000、 S_r 为0.6的带60°斜肋的壁面换热系数云图.从图3b、3c可以看出,第6、7根肋之间换热系数最大.在进口附近,沿 X 方向入流流量较大,且60°肋对流动有较大扰动,使换热系数呈逐渐增强趋势,并在第6、7根肋处达到最高,但随后由于出流的影响,沿 X 方向的流速不断减小,换热系数逐渐下降.同时,可以看出在一个周期上,换热系数的分布表现出相同的变化规律.

图3d、3e分别是同一位置无出流孔和有出流孔时的壁面换热系数云图,其中图3d是斜肋无出流时的局部放大换热系数云图,图3e是斜肋出流比为0.6时的局部放大换热系数云图.对比图3d、3e可以看出,换热增强区沿肋方向分布,且在出流孔附近存在一个换热增强区.这是因为肋角度所引发的二次流动可以改变气膜孔入口处流动的方向,使得两肋之间的气流流向偏转,二次流和主流共同作用使得换热系数增强区域指向沿斜肋方向和主流方向之间的位置.在斜肋的后下部(图3e中1区),换热增强是由于气流经过肋形成沿肋方向不断上升并且逐渐减弱的纵向涡,在肋的上部(图3e中2区),换热增强是由出流孔的抽吸作用而从肋上部引来了一股气流所致.在出流孔上游区域(图3e中3区),换热被强化的主要原因是:出流孔的出流使出流孔的上游边界层内的流体得到加速,使得边界层的厚度减小.在出流孔下游区域(图3e中4区),换热被强化的原因主要是:出流孔的存在破坏了充分发展的边界层,其下游的边界层再次生成;另外,主要在出流

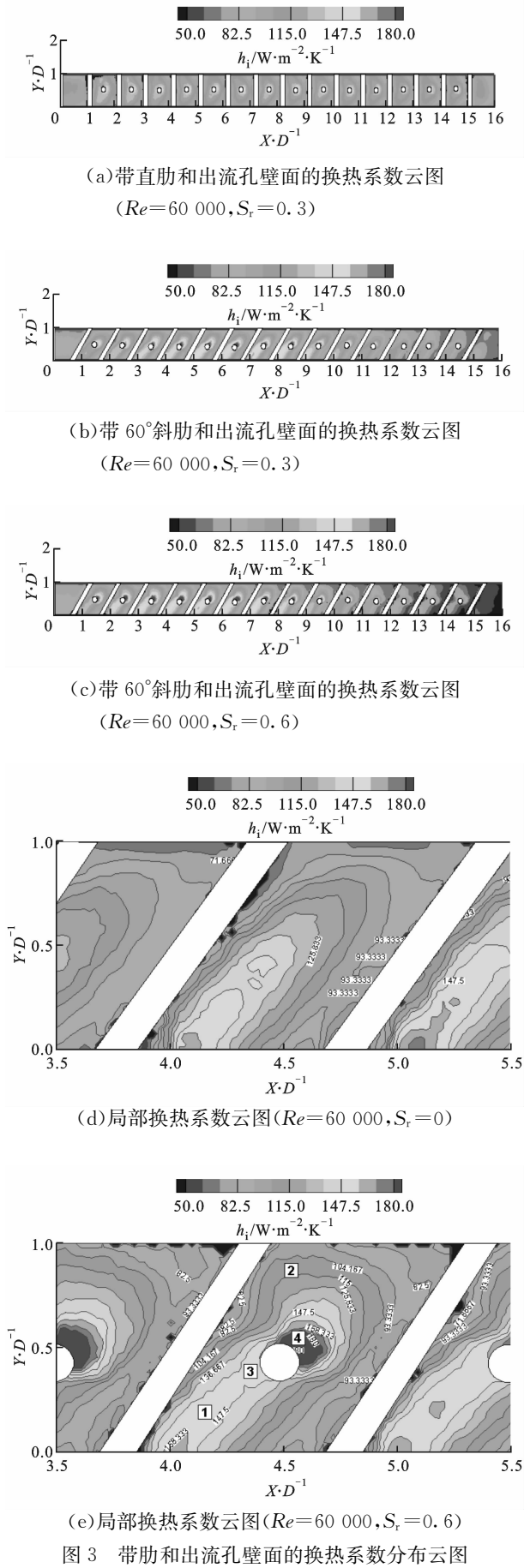


图3 带肋和出流孔壁面的换热系数分布云图

孔下游由于孔的抽吸作用使气流产生一冲向壁面的分速度,这种分速度对壁面产生了一定的冲击、扰流作用,由此换热被强化.出流比越大,这种主流对壁面的冲击、扰动作用就越强,影响范围也更大,因此换热被强化的区域范围以及换热被强化的程度也相对越大.

2.2 雷诺数对平均换热系数的影响

图4是带 60° 肋和出流孔壁面的 $\overline{Nu}$ 随 Re 的变化图,可以看出在各种出流比下,端壁 $\overline{Nu}$ 都是随着 Re 的增大基本呈线性增加,这一点与光滑管内的流动是相似的.图5给出了换热增强系数(端壁 $\overline{Nu}$ 与 Nu_0 之比)随 Re 的变化,其中 Nu_0 是按照经典的光滑管内强制对流换热经验公式 $Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.33}$ 计算的.可以看出:在所有的实验出流比下,换热增强系数均大于1,在各种出流比下,换热增强系数随雷诺数的增加而减小,说明雷诺数越大,肋的强化换热效果越低.就 60° 肋而言,换热增强主要是因为斜肋会引发平行于肋方向的二次流动,在小雷诺数下,由于主流方向的动量小,斜肋更加容易将主流方向的流体导流到横向.

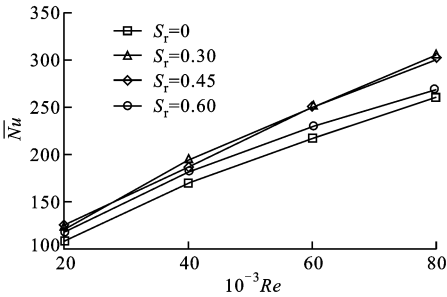


图4 平均努塞尔数随雷诺数的变化

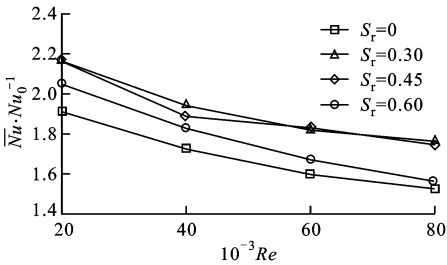


图5 换热增强系数随雷诺数的变化

2.3 出流比对平均换热系数的影响

图6是 $\overline{Nu}$ 随 S_r 的变化图,可以看出对于每一个确定的 Re ,壁面上的 $\overline{Nu}$ 随着 S_r 的变化不再是单调的增或减,而是先增大后减小.图7是换热增强系数随 S_r 的变化图,可以看出,换热增强系数也是随

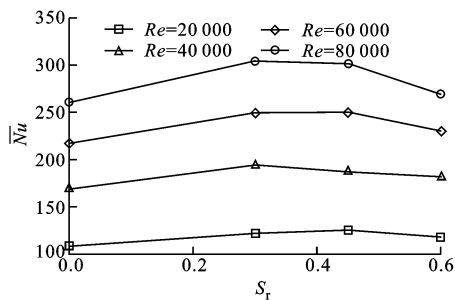


图6 平均努塞尔数随出流比的变化

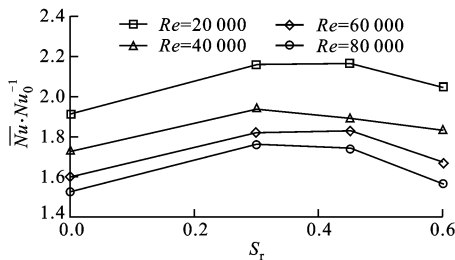


图7 换热增强系数随出流比的变化

S_r 的增大先增大后减小。带60°肋和出流孔壁面的 $\overline{Nu}$ 和换热增强系数随 S_r 变化有一个极大值,造成这种现象的主要原因是:测试壁面出流孔的抽吸作用对孔附近区域有冲击的作用,致使孔附近区域的换热明显增强,在前6个出流孔,出流比越大,增强的区域也越大;随后,由于在大出流比情况下,大部分的流量都从前面出流孔流出,致使后面出流孔出流已经比较少,流量变得很小,此时的速度相比小出流比的情况来得更低,换热增强程度减弱。因此,在第7根肋后面的区域,如图3b、3c所示, $S_r=0.3$ 时的换热系数大于 $S_r=0.6$ 时的换热系数。

3 结论

本文采用热色液晶瞬态测量技术,在 $Re=20\,000\sim 80\,000$ 、 $S_r=0\sim 0.6$ 的条件下,对带60°斜肋和出流孔的通道内壁面换热特性进行实验研究,得到了以下结论。

(1)斜置肋片引起的二次流增加了肋的扰流作用,斜肋比直肋更有利于增强换热。由于出流孔的抽吸作用,出流孔附近换热增强,斜肋有出流时,壁面换热增强。

(2)沿通道长度方向,随着通道长度的增加,端壁换热系数先增大后减小。在每两肋之间的壁面上,

换热系数的分布表现出相同的变化规律。

(3)在各种出流比下,端壁平均努塞尔数都是随着雷诺数的增大基本呈线性增加,换热增强系数随雷诺数的增大而减小。

(4)在各种雷诺数下,端壁平均努塞尔数和换热增强系数都是随出流比的增大先增大后减小,平均努塞尔数和换热增强系数随出流比变化有一个极大值。换热增强系数在本文的实验工况下均大于1.5,在雷诺数为20 000、出流比为0.45时,换热增强系数最大可达2.2。

参考文献:

- [1] HAN J C. Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1988, 110: 321-328.
- [2] JIANG Y J, CHEN H C, HAN J C. Prediction of flow and heat transfer in rotating two-pass rectangular channels with 45-deg rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(4): 146-152.
- [3] 徐磊,常海萍,毛军逵,等. 气膜出流冷气侧气膜孔附近壁面换热特性[J]. 推进技术, 2007, 28(2): 141-143.
XU Lei, CHANG Haiping, MAO Junkui, et al. Local heat transfer characteristics near film cooling holes on cooling side in film cooling [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 141-143.
- [4] 裘云,朱惠人,许都纯,等. 出流孔对内流通道壁面换热影响的实验[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 477-480.
QIU Yun, ZHU Huiren, XU Duchun, et al. Effect of suction hole on heat transfer characteristic of internal passage[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(6): 477-480.
- [5] SHEN J R, WANG Z, IRELAND P T, et al. Heat transfer enhancement within a turbine blade cooling passage using ribs and combinations of ribs with film cooling holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3): 428-34.
- [6] 苏福斌,朱惠人,郭涛,等. 内冷通道带肋和出流孔壁面的换热研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1500-1506.
SU Fubin, ZHU Huiren, GUO Tao, et al. Heat transfer enhancement within an internal passage by combinations of ribs and suction holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1500-1506.

(编辑 荆树蓉)