

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0206-07

肋的几何参数对网格式肋化通道的 传热与总压损失特性的影响

张 勃¹, 吉洪湖¹, 张靖周¹, 高 潮¹, 王 鸣²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 通过 10 个实验模型研究了肋宽与肋间距之比 t/p 以及肋宽与肋高之比 t/e 对网格式肋化通道的换热与总压损失的影响。实验模型分为两组: 第一组 5 个 45/45 模型是由两块肋向角分别为 45° 与 -45° 的肋化板形成的; 第二组 5 个 45/60 模型是由肋向角分别为 45° 和 -60° 的两块肋化板形成的。模型的 t/e 分别为 0.25, 0.30, 0.50, t/p 分别为 0.25, 0.33, 0.50。在雷诺数为 $0.5 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$ 时, $t/e = 0.30$ 与 $t/p = 0.50$ 的模型换热效果最好, 但同时压损也最大。45/45 模型与 45/60 模型的换热效果没有明显的区别, 但后者的压损却是前者的近两倍。根据实验数据拟合得到了有关参数的准则关系式。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡轮叶片; 肋化通道; 强化传热; 总压损失

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influence of Rib's Geometric Parameters upon Heat Transfer and Total Pressure Loss in Grid-Ribbed Channel

ZHANG Bo¹, JI Hong-hu¹, ZHANG Jing-zhou¹,
Gao Chao¹, Wang Ming²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aero-Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The influence of width-to-pitch ratio (t/p) and width-to-height ratio (t/e) of ribs upon heat transfer and total pressure loss of rectangular grid-ribbed channel was studied experimentally. Two groups of experimental models were used. The first group was consisted of two ribbed plates with ribs at 45° and -45° to the axis of the channel, respectively, named as 45/45 model. The second group of experimental models was consisted of two plates with rib angle at 45° and -60° and named as 45/60 model. For these models, t/e varies among 0.25, 0.3, 0.5, and t/p varies among 0.25, 0.33, 0.5. The Reynolds numbers varied from 0.5×10^5 to 1.5×10^5 . The results showed that the models with $t/p = 0.5$ and $t/e = 0.3$ got the best heat transfer enhancement, but also caused highest total pressure drop. The 45/45 model and 45/60 model have similar heat transfer performance, while the latter caused much higher total pressure loss than the former.

收稿日期: 2003-05-27; 修订日期: 2004-03-10

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 99C52023)

作者简介: 张勃 (1976-), 男, 江苏南京人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热传质及红外隐身研究。

Key words: aerospace propulsion system; turbine blade; ribbed channel; heat transfer enhancement; total pressure loss

网格化肋化通道是一种可用于涡轮叶片内部冷却的结构形式。它是一种非常规肋化通道,其主要特点是矩形通道的两长边壁面上的肋高度达到了通道高度的一半($e/H=0.5$),即肋尖相互接触,形成了网格状通道。流体在通道内部上下曲折流动。张勃等人^[1]针对网格化通道的换热与总压损失特性的实验研究表明,这种冷却通道的换热比常规肋化通道提高了 2.5~3 倍,与此同时,总压损失也有明显的增加。

本文在文献[1]的基础上进一步研究了肋的几何参数:肋宽与肋间距之比 t/p 和肋宽与肋高之比 t/e 对通道的换热与总压损失的影响。

1 实验简介

本文所采用的实验系统与文献[1]相同,不再详述。为了研究 t/p 和 t/e 的影响,采用了 10 个实验模型,其主要几何参数如表 1 所示。其中模型 1, 3, 5, 7, 9 是由两块肋向角分别为 45°与-45°的肋化板形成的,简称 45/45 模型;模型 2, 4, 6, 8, 10 则是由肋向角分别为 45°与-60°的肋化板形成的,简称 45/60 模型。这些模型 t/e 取值为 0.25, 0.30, 0.50, t/p 取值为 0.25, 0.33, 0.50。

本文采用的数据处理方法及各流动、换热参数的定义均和文献[1]相同,实验雷诺数范围为 $0.5\times10^5\sim1.5\times10^5$ 。

表 1 模型肋的几何参数

Table 1 Geometric parameters of ribs of studied models

模型编号	α	t/p	t/e
1	45/ 45	0.25	0.30
3		0.33	0.30
5		0.50	0.30
7		0.33	0.50
9		0.33	0.25
2	45/ 60	0.25	0.30
4		0.33	0.30
6		0.50	0.30
8		0.33	0.50
10		0.33	0.25

2 实验结果分析

2. 1 模型参数对通道换热特性的影响

图 1 和图 2 中分别给出了各个模型的平均努塞尔数 $\overline{Nu}^{[1]}$ 实验数据点以及相应的拟合曲线。可以看出, $\overline{Nu}$ 随 Re 的增大而增大,拟合曲线真实反映了 $\overline{Nu}$ 随 Re 的变化趋势,拟合公式如下:

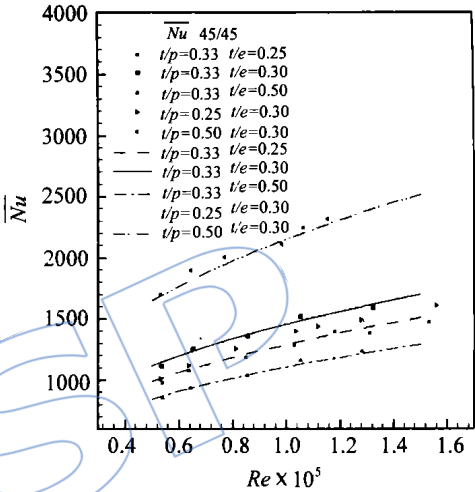


图 1 45/45 模型的 $\overline{Nu}$ 随 Re 的变化

Fig. 1 The effect of Re number on $\overline{Nu}$ for 45/45 model

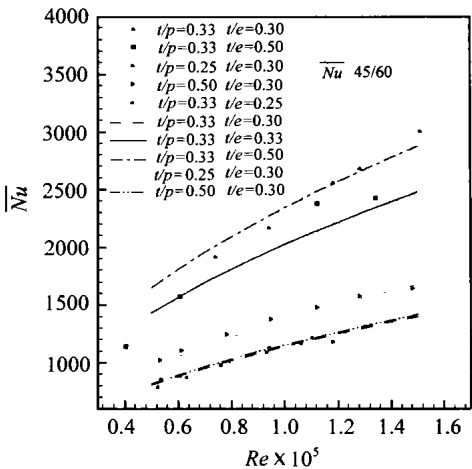


图 2 45/60 模型的 $\overline{Nu}$ 随 Re 的变化

Fig. 2 The effect of Re number on $\overline{Nu}$ for 45/60 model

45/45 模型:

$$\overline{Nu} = 9.01[-47.8 \cdot (t/e)^2 + 36.29(t/e) - 5.235] \cdot [-17.88(t/p)^2 + 13.37(t/p) - 1.465] \cdot (t/p)^{1.05} \cdot (t/e)^{-0.419} Re^{0.502}$$

45/60 模型:

$$\overline{Nu} = 24.78[-15 \cdot (t/e)^2 + 11.65(t/e) - 1.145] \cdot [9.12(t/p)^2 + 7.04(t/p) + 2.34] \cdot (t/p)^{0.745} \cdot (t/e)^{-0.389} Re^{0.384}$$

上述公式适用范围:

$$0.5 \times 10^5 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5, \quad 0.25 \leq t/e \leq 0.5, \quad 0.25 \leq t/p \leq 0.5$$

图 3 至图 6 分别给出了不同 t/p 和不同 t/e 条件下网格通道的换热强化比, 即模型的平均努塞尔数 $\overline{Nu}$ 与充分发展光滑管流的努塞尔数的 $Nu_{FD}^{[1]}$ 比值。随雷诺数的变化, 总体来说, 模型的换热强化比 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 介于 5~14 之间, 并随雷诺数的增大而逐渐减小。

图 5 与图 6 分别给出了 45/45 与 45/60 模型中, 当 $t/p=0.33$ 时, 不同 t/e 值对换热强化比的影响。在 $t/e=0.30$ 时, 模型的换热强化比最大, $t/e=0.25$ 和 $t/e=0.50$ 时换热强化比依次降低。

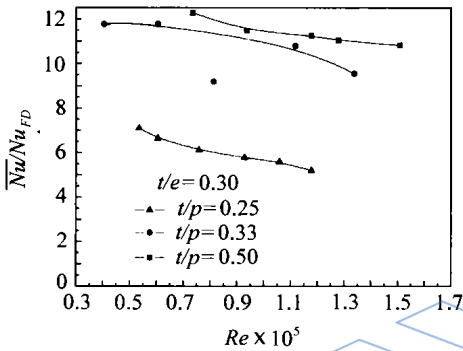


图 3 t/p 对 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的影响 (45/45 模型)

Fig. 3 The effect of t/p on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ for 45/45 model

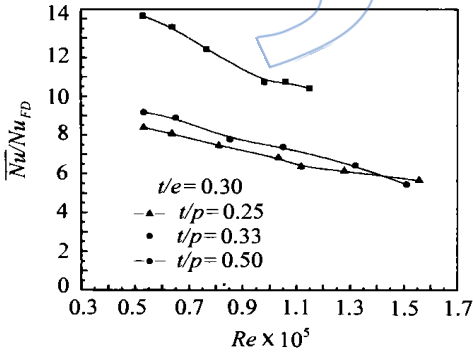


图 4 t/p 对 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的影响 (45/60 模型)

Fig. 4 The effect of t/p on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ for 45/60 model

图 3 和图 4 分别给出了 45/45、45/60 这两组模型中, 当 $t/e=0.30$ 时, 不同 t/p 值的模型之间换热强化比的比较关系。两组模型中, 均是 $t/p=0.50$ 的模型换热效果最好, $t/p=0.33$ 和 $t/p=0.25$ 时模型换热效果依次下降。模型换热强化比达到了 13~14, 最小也在 5 以上。

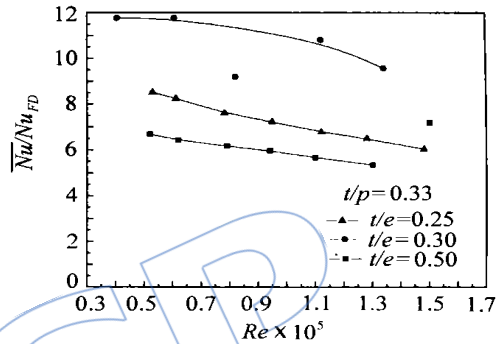


图 5 t/e 对 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的影响 (45/45 模型)

Fig. 5 The effect of t/e on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ for 45/45 model

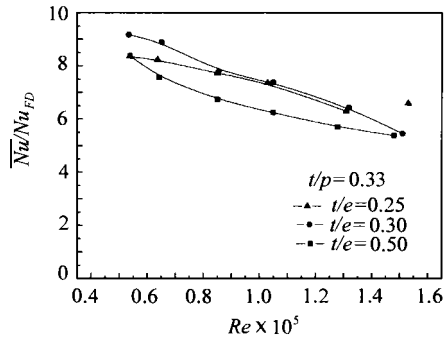


图 6 t/e 对 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的影响 (45/60 模型)

Fig. 6 The effect of t/e on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ for 45/60 model

从图 3 与图 4 可以得到, 在实验研究的参数范围内, 提高 t/p 的值对增强换热是有利的; 而图 5 与图 6 的结果则说明在实验研究的 t/e 范围内存在换热的最佳值, 当 $t/e=0.30$ 时, 换热效果最好。

图 7 和图 8 分别通过模型 9 和 10 ($t/e=0.25$, $t/p=0.33$) 和模型 5 和 6 ($t/e=0.30$, $t/p=0.50$) 的结果比较了 45/45 模型与 45/60 模型

的换热强化比。可以看出, 不同肋向角组合的两组模型的换热效果没有明显的区别 (其余模型的有关结果类似, 限于篇幅不再详述)。

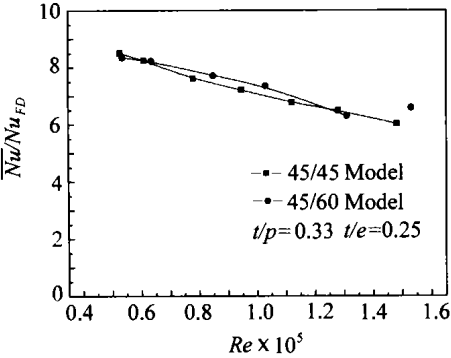


图 7 45/45 模型与 45/60 模型的 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的比较
($t/e = 0.30$, $t/p = 0.50$)

Fig. 7 Comparison of t/e on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ between 45/45 model and 45/60 model
($t/e = 0.30$, $t/p = 0.50$)

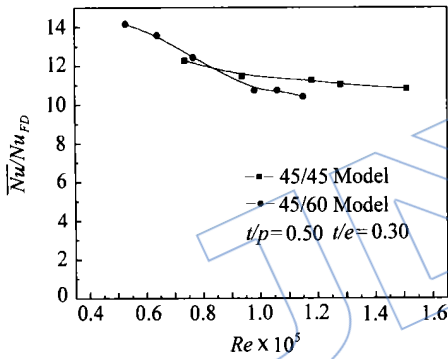


图 8 45/60 模型与 45/60 模型的 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的比较
($t/e = 0.30$, $t/p = 0.50$)

Fig. 8 Comparison of t/e on $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ between 45/60 model and 45/60 model
($t/e = 0.30$, $t/p = 0.50$)

2. 2 模型参数对通道总压损失的影响

图 9 和图 10 给出了各个模型的总压损失 f 的实验值和相应的拟合曲线。可以看出, 拟合曲线与实验点贴合程度较好, 具体拟合公式如下:

45/45 模型:

$$f = 5.93[-11.8(t/e)^2 + 9.09(t/e) - 0.625](t/p)^{1.11}(t/e)^{-0.187}Re^{0.0818}$$

45/60 模型:

$$f = 19.3[-4(t/e)^2 + 3(t/e) + 0.5] \cdot (t/p)^{0.609}(t/e)^{0.0694}Re^{0.00312}$$

上述公式适用范围为:

$$0.5 \times 10^5 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$$

$$0.25 \leq t/e \leq 0.50, \quad 0.25 \leq t/p \leq 0.50$$

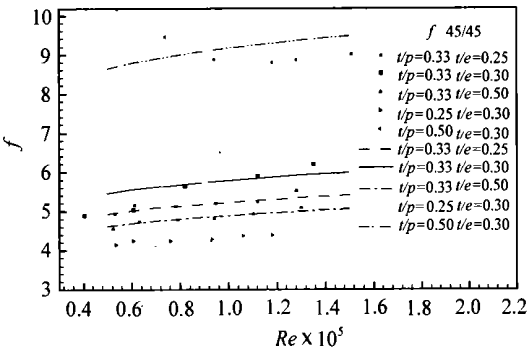


图 9 45/45 模型的 f 随 Re 的变化
Fig. 9 The effect of Re number on f for 45/45 model

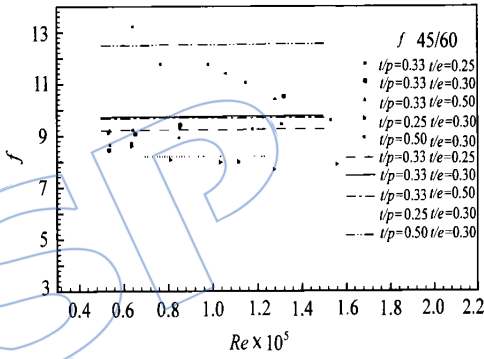


图 10 45/60 模型的 f 随 Re 的变化
Fig. 10 The effect of Re number on f for 45/60 model

图 11 至图 14 给出了 t/e 和 t/p 对网格化肋化通道的阻力增大比 (即, 网格化通道的总压损失系数 f 与光滑管完全紊流摩擦阻力系数 f_{FD} 的比值, 定义见文献 [1]) 的影响。可以看出, 随着 Re 的增大, 模型的阻力增大比 f/f_{FD} 呈增大趋势。

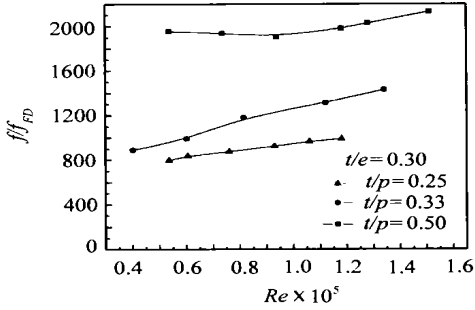


图 11 t/p 对 f/f_{FD} 的影响 (45/45 模型)
Fig. 11 The effect of t/p on f/f_{FD} for 45/45 model

从图 11 和图 12 可以看出, 在 $t/e = 0.30$ 时,

阻力增大比随 t/p 的增大而增加。 $t/p=0.50$ 时通道的阻力增大比最大,接近2800; $t/p=0.25$ 时最小,但仍达到了1800。比较图3和图4,可以发现,强化换热效果好的模型总压损失也较大。

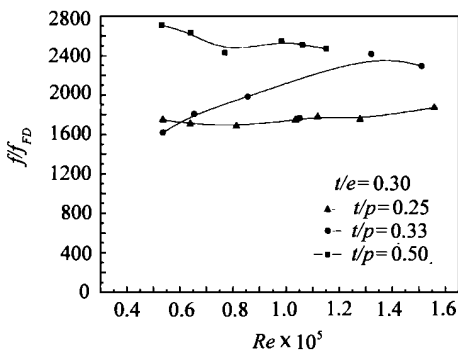


图 12 t/p 对 f/f_{FD} 的影响 (45/60 模型)
Fig. 12 The effect of t/p on f/f_{FD} for 45/60 model

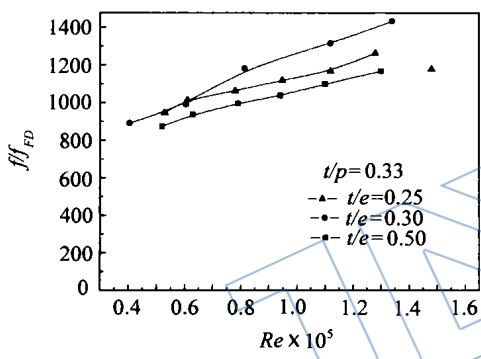


图 13 t/e 对 f/f_{FD} 的影响 (45/45 模型)
Fig. 13 The effect of t/e on f/f_{FD} for 45/45 model

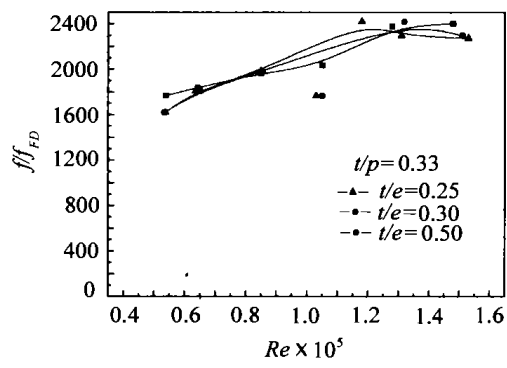


图 14 t/e 对 f/f_{FD} 的影响 (45/60 模型)
Fig. 14 The effect of t/e on f/f_{FD} for 45/60 model

从图13和图14可以看出,在 $t/p=0.33$ 时,阻力增大比随 t/e 不是单调变化的。对于45/45模型(图13), $t/e=0.30$ 时通道的阻力增大比最

大,最大值达到1400, $t/e=0.25$ 和0.50的通道依次减小。比较图5可以看出,较高阻力增大比的模型的强化换热比也是较大的。而对于45/60模型(图14), t/e 对通道阻力增大比的影响不明显。

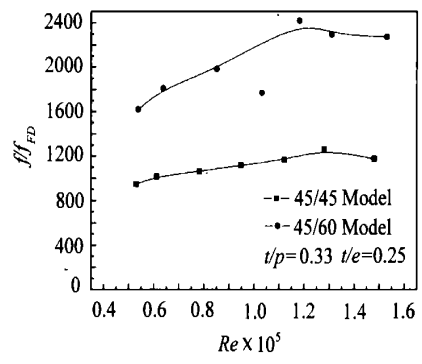


图 15 45/45 模型与 45/60 的 f/f_{FD} 的比较
($t/e=0.30$, $t/p=0.50$)
Fig. 15 Comparison of f/f_{FD} between 45/45 model and 45/60 model
($t/e=0.30$, $t/p=0.50$)

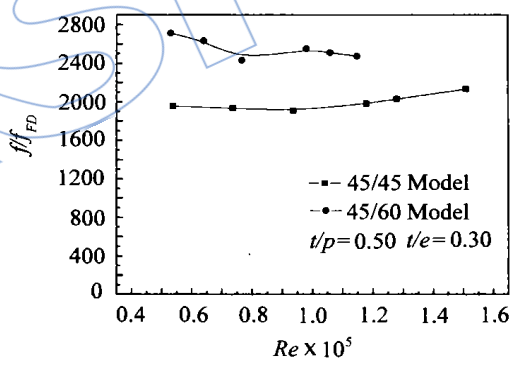


图 16 45/45 模型与 45/60 的 f/f_{FD} 的比较
($t/e=0.25$, $t/p=0.33$)
Fig. 16 Comparison of f/f_{FD} between 45/45 model and 45/60 model
($t/e=0.25$, $t/p=0.33$)

在实验研究范围内,网格式通道的总压损失系数比光滑通道的摩擦系数高出3个数量级,这是由于通道内部结构复杂,总压损失不仅仅是由于摩擦引起的,通通面积的严重堵塞,大量涡的存在,都会导致通道总压损失的增加。

图15和图16比较了45/45与45/60模型的阻力增大比。可以看出,45/60模型的阻力增大均远大于45/45模型,这是由模型内部的实际结构造成的。图17(a)为网格式肋化通道内部流路示意图。为了清晰起见,图中未画出通道的上壁面和两个侧壁面。流体在通道内绕着肋流动,由上

下板的肋围成的三角形区域为流通区域。图 17 (b) 为 45/45 模型与 45/60 模型的流通面积的比较示意图(俯视)。在上下肋围成的流通区域内流体是垂直纸面流动的。45/60 模型的流通面积约为 45/45 模型的 64%, 较小的流通面积带来了较大的总压损失。

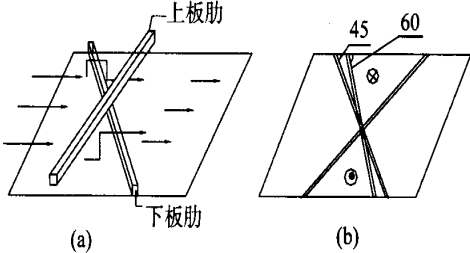


图 17 45/45 模型和 45/60 模型流路示意图
Fig. 17 Comparison of passage areas between 45/45 model and 45/60 models

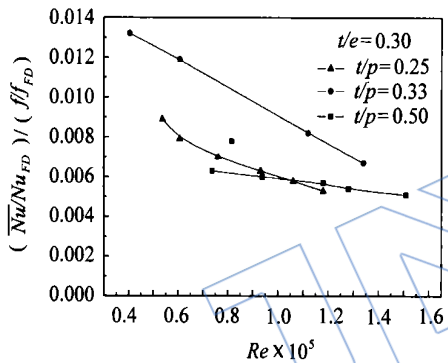


图 18 t/p 对 η 的影响 (45/45 模型)
Fig. 18 The effect of t/p on η in 45/45 model

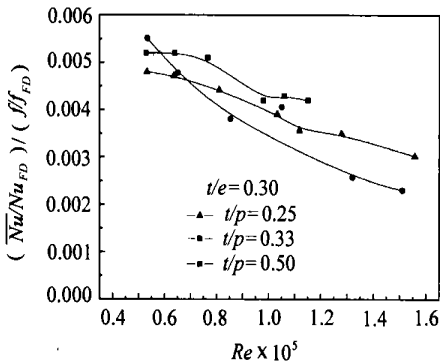


图 19 t/p 对 η 的影响 (45/60 模型)
Fig. 19 The effect of t/p on η in 45/60 model

2. 3 模型参数对通道综合肋化效率的影响

本文中引入综合肋化效率 η , 即强化换热比 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 与阻力增大比 f/f_{FD} 的比值

$$\eta = \frac{\overline{Nu}/Nu_{FD}}{f/f_{FD}}$$

来综合评价网格式通道换热与压损特性。图 18~图 21 给出了不同 t/e 与 t/p 的通道的肋化综合效率曲线图。由前文可知, $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 随雷诺数的增大是减小的, 而 f/f_{FD} 却是增大的, 所以综合肋化效率随 Re 上升是减小的。其值较小, 最大不超过 0.014。

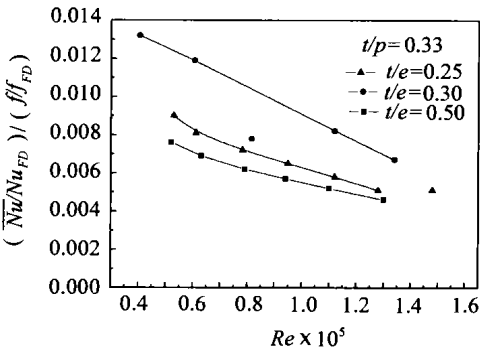


图 20 t/e 对 η 的影响 (45/45 模型)
Fig. 20 The effect of t/e on η in 45/45 model

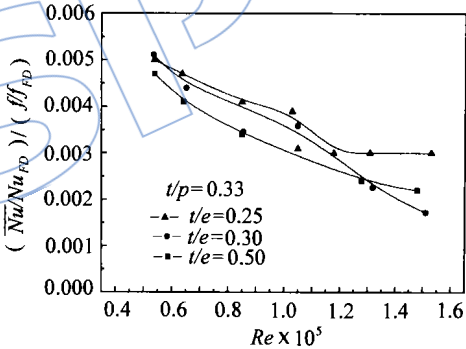


图 21 t/e 对 η 的影响 (45/60 模型)
Fig. 21 The effect of t/e on η in 45/60 model

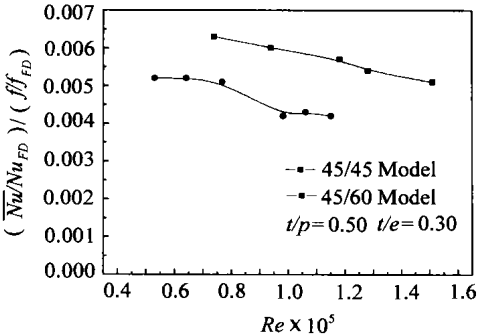


图 22 45/45 模型与 45/60 模型的 η 的比较
($t/e = 0.30, t/p = 0.50$)
Fig. 22 Comparison of η between 45/45 model and 45/60 model
($t/e = 0.30, t/p = 0.50$)

从图 18 和图 19 可以看出, 当 $t/e = 0.30$ 时,

在 45/45 模型中, $t/p = 0.33$ 的模型综合肋化效率好于 0.25 和 0.50 的情况。而在 45/60 模型中, 则是 $t/p = 0.50$ 模型较好。

从图 20 和图 21 可以看出, 当 $t/p = 0.33$ 时, 45/45 模型中, $t/e = 0.30$ 时模型综合肋化效率好于 0.25 和 0.50 的情况。而在 45/60 模型中, 则是 $t/p = 0.25$ 的模型较好。

图 22 和图 23 比较了 45/45 模型与 45/60 模型的综合肋化效率 η , 45/45 模型的综合肋化效率明显好于 45/60 模型。

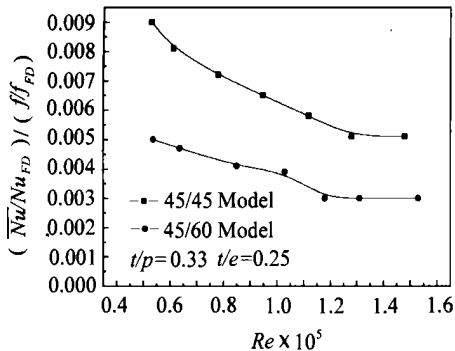


图 23 45/45 模型与 45/60 模型的 η 的比较
($t/e = 0.25, t/p = 0.33$)

Fig. 23 Comparison of η between 45/45 model and 45/60 model
($t/e = 0.25, t/p = 0.33$)

实验的努塞尔数相对误差为 4.6%, 总压损失系数误差为 10.1%^[2]。

3 结 论

(1) 网格式肋化通道提高了通道换热效果, 模型强化换热比 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 在 5~14 之间, 随雷诺数的增大, $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 是逐渐减小的。

(2) 网格式肋化通道也极大地增大了通道的总压损失, 模型阻力增大比 f/f_{FD} 达到了 3 个数量级, 随雷诺数的增大, f/f_{FD} 逐渐增大。

(3) 在实验研究的 t/p 范围内, t/p 为 0.50 时模型换热强化比和阻力增大比均为最大, $t/p = 0.33, 0.25$ 的模型依次减小。

(4) 在实验研究的 t/e 范围内, t/e 为 0.3 时模型换热强化比最大, $t/e = 0.25$ 和 0.50 时依次减小。阻力增大比在 45/45 模型中是 $t/e = 0.30$ 时最大; 而在 45/60 模型中则是 $t/e = 0.50$ 的模型较大。

(5) 在实验研究的 t/p 和 t/e 范围内, 在 45/45 模型中, 分别是 $t/p = 0.33$ 和 $t/e = 0.30$ 时模型肋化效率最大, t/p 为 0.25 和 0.5 的模型依次减小, t/e 也是 0.25 和 0.50 依次减小; 而在 45/60 模型中, 对于不同 t/p 的模型, 0.50 时最大, 0.25, 0.33 依次减小, 对于不同 t/e 的模型, 则是 0.25, 0.30, 0.50 依次减小。

(6) 45/45 模型和 45/60 模型的强化换热比没有明显的区别, 但是后者的阻力增大比明显大于前者, 这使得后者的综合肋化效率小于前者。

(7) 实验拟合得到了通道平均换热努塞尔数和总压损失系数关于 $t/p, t/e$ 以及 Re 的经验关系式。

参考文献:

[1] 张勃, 吉洪湖, 张靖周, 等. 网格式肋化通道换热与总压损失特性研究 [J]. 航空动力学报, 2004, 19 (2): 201-205.
[2] 张勃. 网格式肋化内冷通道的强化换热与流动阻力特性实验研究 [D]. 江苏 南京: 南京航空航天大学, 2002.