

## 气膜-发散组合冷却结构换热特性的实验研究\*

田美<sup>1</sup>, 冯晓星<sup>2</sup>, 石蕊<sup>3</sup>, 邓向阳<sup>2</sup>, 杨卫华<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏南京 210016;

2. 中国航发商用航空发动机有限公司, 上海 200241;

3. 空间物理重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 为了研究气膜-发散组合冷却结构的冷却特征, 保证相同的开孔率, 设计了三种不同发散孔排布形式的组合冷却结构, 采用实验的方法对气动参数和几何参数对绝热冷却效率和对流换热系数的影响规律开展了研究。结果表明: 绝热冷却效率和对流换热系数沿主流方向先逐渐降低, 达到最低点后沿流动方向二者基本保持不变; 在研究参数范围内, 主流雷诺数和吹风比对绝热冷却效率的影响不大, 但对组合冷却结构的对流换热系数影响较大, 随着主流雷诺数和吹风比的增加, 对流换热系数均呈现逐渐增大的趋势; 针对三种发散孔排布形式的绝热冷却效率和对流换热系数, 流向间距大的气膜发散冷却结构最高, 流向间距居中的气膜发散冷却结构次之, 流向间距最小的气膜发散冷却结构最低。

**关键词:** 航空发动机; 火焰筒冷却; 气膜-发散组合冷却; 绝热冷却效率; 对流换热系数

**中图分类号:** V231.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2018) 08-1771-09

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.08.011

## Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristics of Film-Effusion Combined Cooling

TIAN Mei<sup>1</sup>, FENG Xiao-xing<sup>2</sup>, SHI Rui<sup>3</sup>, DENG Xiang-yang<sup>2</sup>, YANG Wei-hua<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Commercial Aircraft Engine Co. Ltd, Shanghai 200241, China;

3. Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to study the cooling characteristics of film-effusion combination cooling structure, three kinds of test pieces of different effusion cooling holes arrangement but equivalent orifice area were designed. The effects of aerodynamic parameters and geometric parameters on the adiabatic cooling efficiency and the convective heat transfer coefficient were investigated experimentally. The experimental results show that the adiabatic cooling efficiency and convective heat transfer coefficient gradually decrease in the direction of mainstream, and reach the lowest point, then they remain unchanged. The main flow Reynolds number and the blowing ratio have no evident effect on the adiabatic cooling efficiency under research range of parameters, but the effect on convective coefficient is evident, that is increased gradually with the increase of main flow Reynolds number or blowing ratio. For the three test specimens, the adiabatic cooling efficiency and the convective coefficient of the cooling structure of the largest stream wise spacing are the largest, and followed by the cooling structure of medium stream wise spacing, and the minimum is the cooling structure of the minimum stream wise spacing.

\* 收稿日期: 2017-07-07; 修订日期: 2017-09-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (51276088)。

作者简介: 田美, 女, 硕士生, 研究领域为飞机发动机热端部件冷却技术。E-mail: tianmeinuua@163.com

通讯作者: 杨卫华, 男, 博士, 教授, 研究领域为飞机发动机热端部件热防护技术。E-mail: yangwh-sjtu@163.com

**Key words:** Aeroengine; Combustion cooling; Film-effusion cooling; Adiabatic cooling effectiveness; Convective heat transfer coefficient

## 1 引言

随着航空发动机的推重比不断提高,其面临的高温挑战愈加严峻。火焰筒作为燃烧室的重要部件,在燃烧过程中承受着最高的温度载荷。为了保证火焰筒的耐久性和可靠性,必须采用先进高效的冷却措施对火焰筒壁面进行冷却。发散冷却<sup>[1,2]</sup>由于其结构特点,冷气经小孔出流后会在壁面逐渐形成分布均匀的气膜层。国内外已有多位学者对发散冷却进行了研究<sup>[3-9]</sup>,Yang等<sup>[10]</sup>通过实验得出复合角是影响冷却效率的主要因素之一,复合角越大,冷却效率越低。Zhong等<sup>[11]</sup>采用试验的方法对多斜孔气膜冷却特性进行了研究。结果表明,在吹风比小于0.4时,随着雷诺数的增大,冷却效率逐渐减小;而吹风比大于0.6时,主流雷诺数对气膜冷却效率的影响变小。李广超等<sup>[12]</sup>实验研究了气膜孔布局对前缘气膜冷却效果的影响,研究表明孔间距增加会使得径向平均冷却效果变差。胡娅萍等<sup>[13]</sup>对孔型排列疏密度对致密多斜孔壁冷却效果的影响进行了数值研究,结果表明,在一定范围内,孔阵排列的疏密度越大,冷却效果越好。林宇震等<sup>[14]</sup>研究了多斜孔壁冷却方式中小孔内部对流的局部和平均换热情况,结果表明,孔内雷诺数对换热增强幅度影响很大,孔内雷诺数越高,换热增强越大。Fric等<sup>[15]</sup>研究了吹风比对流动分离现象的影响,结果表明气膜覆盖效果在吹风比1.7~3.3最差,吹风比继续增加后有所提高。李彬等<sup>[16]</sup>通过实验得出综合冷却效率的主要影响因素有几何结构,孔内部对流换热和绝热温比。对于发散冷却结构而言,由于起始段发散冷却气膜未能在发散孔壁面形成有效的气膜覆盖,使得在起始段冷却效率较低(如图1所示),壁面温度远远高于发散冷却的充分发展段,造成发散冷却的起始段容易发生烧蚀而使燃烧室损毁。为了解决发散冷却起始段的这一缺陷,将发散冷却结构与气膜冷却结构相结合,组成气膜发散复合冷却形式,亦即在发散冷却结构上游区域增加一气膜冷却狭缝,用气膜狭缝喷出的冷却气膜与发散冷却结构起始气膜相互叠加,对发散冷却起始段进行冷却,从而使得整个冷却结构的壁面温度均匀一致,冷却效率沿流向均保持较高的水平。Facchini等<sup>[17,18]</sup>采用实验和数值模拟的方法研究了气膜发散组合冷却结构绝热冷却效率和对流换

热特征,实验件的几何参数为 $D=1.65\text{mm}$ , $S/D=7.6$ , $P/D=6$ , $L/D=5.5$ , $\alpha=30^\circ$ ,第一排发散孔距气膜出口的距离为1.7S,研究表明,前排气膜无论对绝热冷却效率和对流换热系数均有很大的影响。杨卫华等<sup>[19]</sup>通过实验得出了发散孔的几何结构和吹风比( $M=0.5\sim 3$ )等参数对气膜-发散组合冷却结构综合冷却效率的影响规律,发现前排气膜狭缝不仅极大改善了起始段的效率,也使发散冷却的下游发展段的效率得到一定提高。

综上所述,目前已经有多位学者对气膜发散组合冷却结构的换热特征开展了研究,得到了一些有益的成果,但研究不够充分,特别是气膜发散组合冷却结构的几何参数和流动参数对绝热冷却效率和对流换热系数的影响还不够完善。本文在前人的基础上设计了三种新型的气膜-发散组合冷却结构形式,通过实验研究了发散孔的几何参数和气动参数对气膜-发散组合冷却结构的对流换热特征的影响。

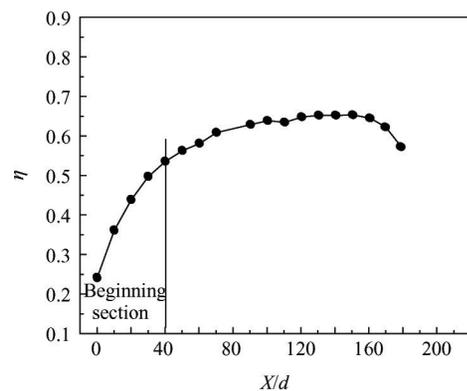


Fig. 1 Film cooling curve of effusion cooling

## 2 实验系统及实验件

### 2.1 实验系统

实验系统如图2所示,空气经压气机后分成两路,一股进入主流管路,经过阀门调节和孔板流量计测量流量后进入电加热器,加热到需求温度,然后进入稳压箱进行整流,最后流入到实验段;另一股气流流入次流管道,经由D08-0C质量控制器(精度1%)测量流量,然后进入实验段。实验段由冷侧通道、热侧通道和实验板组成,如图3所示。在实验段冷侧布置有总压探针、静压探针和K型热电偶,用来测定次流的总压、静压和温度,在热侧通道亦布置有静压探针和热电偶,测量主流的温度和压力,采用TVS-



式中  $\varepsilon_e$  为实验段壁面的发射率,  $T_j, T_2$  分别为加热带表面平均温度以及周围腔体壁面平均温度。试验板的热损失近似认为是沿壁厚方向的一维导热, 如图 5 所示。

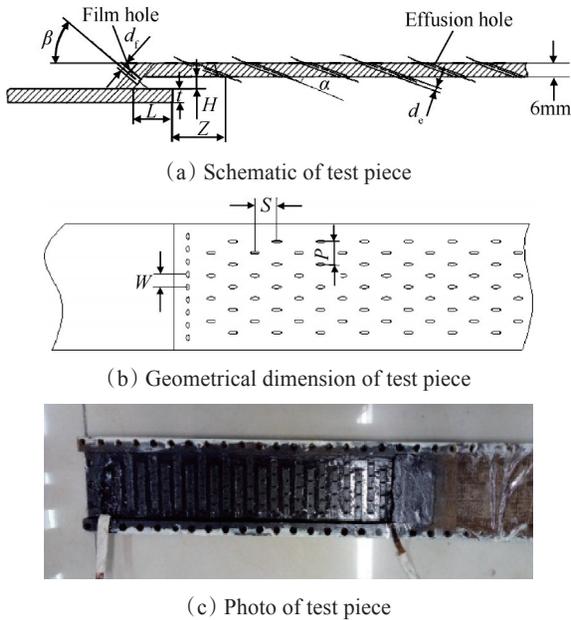


Fig. 4 Test piece

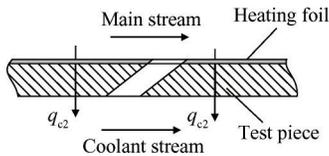


Fig. 5 Thermal conductivity loss of test piece

为了得到通过任意位置  $j$  的试验板热损失  $q_{j,c2}$ , 在其冷侧均匀布置 6 个热电偶, 用于测量冷侧壁面温度, 其值见表 2 所示。根据一维导热公式获得气膜板热损失为

$$q_{j,c2} = \lambda \frac{T_j - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 T_i}{\delta} \quad (8)$$

式中  $T_j$  为加热带平均温度,  $T_i$  为气膜板冷侧热电偶的温度,  $\delta$  为气膜板厚度。

Table 2 Temperatures of cold side of test pieces

No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#
$T/^\circ\text{C}$	29.5	30.8	29.8	31.5	31.6	30.2

实验过程中对加热膜通以直流电, 其参数分别为: 电流  $I=2.64\text{A}$ , 电压  $U=15.5\text{V}$ , 总的加热功率  $q=3225\text{W}/\text{m}^2$ 。根据红外热像测试结果, 热侧壁面平均温度  $T_j=317\text{K}$ 。在实验段热侧金属壁上沿流向布置了 3 只薄膜热电阻, 用于测量热侧通道壁面的温

度, 其值分别为  $65.4^\circ\text{C}$ ,  $65.1^\circ\text{C}$  和  $65.7^\circ\text{C}$ , 即热侧通道壁面的平均温度为  $T_2=338.4\text{K}$ 。

由上述分析可知, 实验段热侧通道壁面的温度 ( $T_2=338.4\text{K}$ ) 高于试验板热侧壁面的温度 ( $T_j=317\text{K}$ ), 而试验板热侧壁面温度显然又高于冷侧温度, 因此热侧壁面会通过导热将加热膜所产生的热流传导到冷侧壁面, 同时由于实验段热侧通道壁面将通过热辐射将辐射热流传递到试验板热侧壁面, 这部分辐射热流补偿了由于热侧壁面向冷侧壁面导热而损失的热流。因此, 总的热损失为

$$q_{\text{loss}} = q_{j,c2} + q_{i,r} \quad (8)$$

根据误差传递公式<sup>[21]</sup>和式(3)、式(4)得到实验研究参数范围内, 绝热冷却效率和对流换热系数的最大相对误差分别为  $(\Delta\eta_{\text{aw}}/\eta_{\text{aw}})_{\text{max}} = 2.42\%$  和  $\Delta h/h = 10.8\%$ 。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 绝热冷却效率

#### 4.1.1 雷诺数对绝热冷却效率的影响

图 6 示出了主流雷诺数  $Re_g$  对三块试验板绝热冷却效率的影响规律。可以看出,  $Re_g$  对冷却效率的影响规律基本相同, 亦即沿主流方向绝热冷却效率呈现先逐渐降低, 在  $X/H=10$  左右达到最低点, 随后沿主流方向冷却效率基本保持不变。分析原因主要是, 在气膜缝槽出口附近区域 ( $X/H<10$ ), 由于前缘气膜喷出的冷却气流撞击到缝槽后互相掺混并分布均匀, 在缝槽出口形成了连续的气膜层, 使此区域的绝热冷却效率较高。随着流动距离的逐渐增大, 气膜缝槽形成的气膜层在主流的夹带卷吸作用下逐渐减弱, 且气膜层温度也在与主流的换热过程中升高, 而发散孔流出的冷却气膜还未能对壁面有效覆盖, 使得冷却效率沿流向逐渐降低, 在  $X/H=10$  附近达到了最低。故在  $X/H<10$  的壁面区域, 由气膜缝槽流出的气膜对壁面的绝热冷却效率起决定作用。但随着流动距离的继续增大, 气膜缝槽流出的冷气作用消失, 发散孔形成的冷却气膜层起到了决定作用。随着此区域发散气膜层的相互叠加, 气膜覆盖效果更加均匀, 使得绝热冷却效率保持平稳, 沿着流向未有较为显著的变化。同时也可以明显看出, 在本实验主流  $Re_g$  数范围内, 总体而言其对绝热冷却效率的影响不大。这是因为本实验是在吹风比为 5 的情况下研究的绝热冷却效率随主流雷诺数的变化规律。在比较大的吹风比时, 随着主流雷诺数的增加, 冷气的动量也随

之增大,导致发散孔出流的冷气速度增加,对主流的穿透作用增强,主流来流的对发散孔出流的冷气提升作用变弱,气膜贴壁效果变差。因此虽然主流雷诺数的增加导致主流的湍动能增加,与热侧壁面的换热增强,但是冷气速度的增加导致气膜的覆盖效果变差,两者的综合作用导致主流雷诺数对绝热冷却效率的影响不明显。

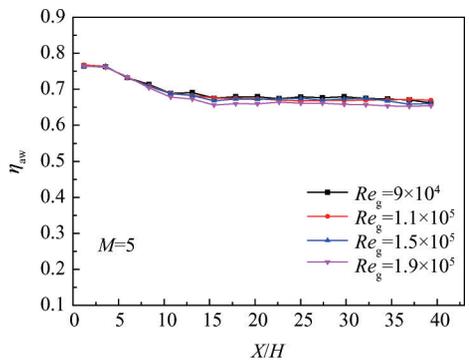
4.1.2 吹风比对绝热冷却效率的影响

图7示出了三块试验板绝热冷却效率随吹风比的变化规律。由图可知,三块试验板的绝热冷却曲线沿流向的变化趋势相似,五种吹风比下的绝热冷却效率曲线基本重合,这说明本实验参数范围内的吹风比对三块试验板的绝热冷却效率的影响区别不大。这是由于随着吹风比逐渐增大,冷却空气射流

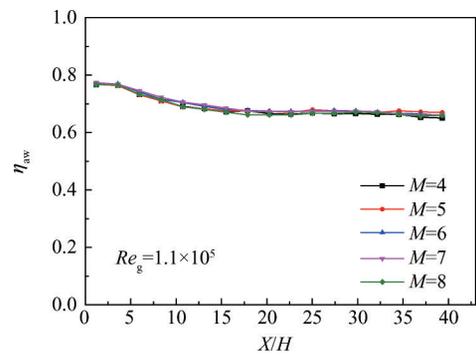
的流量增大,在小吹风比范围内,冷气流量的增加使在热侧壁面形成的气膜更厚更均匀,能够更有效地阻隔主流的高温气流。但是这种趋势并不是单调递增的,当吹风比增大到一定程度之后,吹风比的增加带来的冷气量的增大会导致发散孔出流的冷气速度增加,对主流的穿透作用增强,主流来流的对发散孔出流的冷气提升作用变弱,气膜贴壁效果并不会增强,甚至继续增大吹风比冷却效果会变差。由于本实验的吹风比研究范围比较大,当吹风比 $M>4$ 后,气膜层已足够均匀,此时继续增大吹风比并不能进一步强化气膜层对高温主流的阻隔作用,故绝热冷却效率分布曲线相差不明显。

4.1.3 三种结构绝热冷却效率的比较

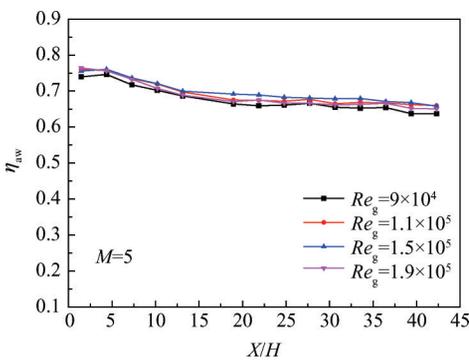
图8示出了三种试验板在不同工况下绝热冷却



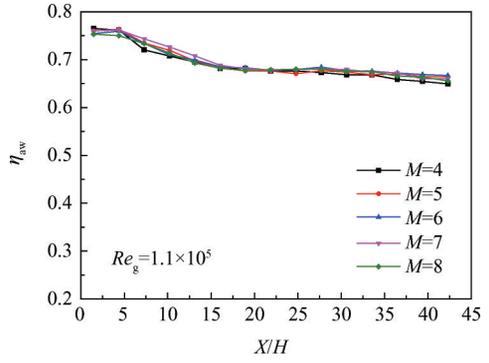
(a)  $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$



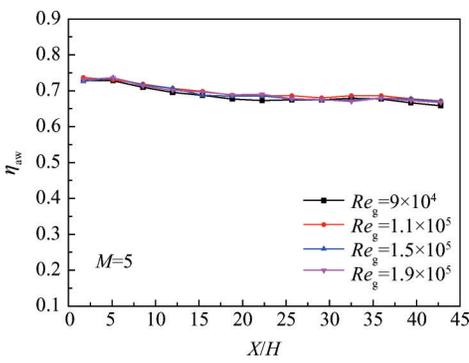
(a)  $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$



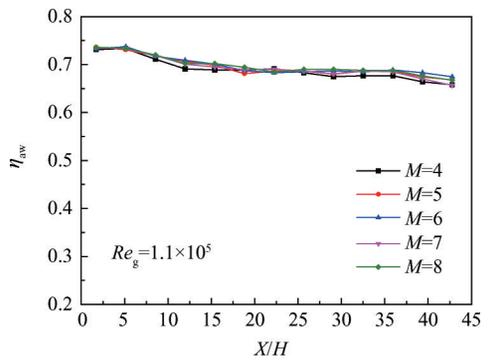
(b)  $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$



(b)  $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$



(c)  $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$



(c)  $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$

Fig. 6 Effects of  $Re_g$  on film cooling effectiveness

Fig. 7 Effects of blowing ratio on film cooling effectiveness

效率的对比。由图可知,三种试验板的绝热冷却效率分布规律在壁面的不同区域表现出不同的特征,具体而言,以 $X/H=10$ 为界,在以 $X/H<10$ 的区域,试验板 $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$ 的绝热冷却效率比 $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$ 和 $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$ 的试验板要略低,原因主要是在此区域内影响壁面绝热冷却效率的主要因素是气膜缝槽喷射出的气膜层,一般而言,当吹风比大于4时,气膜缝槽形成的冷却气膜层具有均匀稳定,且能够对壁面完全覆盖的特征。而试验板 $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$ 的展向间距较小,前两排发散孔的出流破坏了原本覆盖较好的气膜覆盖效果,从而导致气膜冷却效果稍差。在 $X/H>10$ 的区域内,影响壁面绝热冷却效率的主要因素是由多斜孔发散冷却结构喷射而出的发散射流所形成的气膜层的相互叠加作用。可以看出,在此区域内,不同的多斜孔发散冷却结构对绝热冷却效率有较大的影响,一般而言,试验板 $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$ 的绝热冷却效率最大,试验板 $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$ 的绝热冷却效率次之,试验板 $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$ 的绝热冷却效率最小。分析原因主要是:对于试验板 $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$ ,由于其发散孔展向间距较小,发散气流形成的气膜层能够较好地相互叠加,并在主流的作用下向下游扩散,使得其绝热冷却效率最高,而试验板 $S/d_c=$

$7.15, P/d_c=7.37$ 发散孔展向间距最大,不利于发散气膜对其在展向上的完全覆盖,使得冷却气膜在展向不能很好覆盖冷却壁面,造成冷却效率最小。对于试验板 $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$ ,其多斜孔发散冷却结构的几何尺寸介于 $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$ 和 $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$ 之间,造成了其绝热冷却效率居中。

## 4.2 对流换热系数

### 4.2.1 雷诺数对对流换热系数的影响

图9示出了三块试验板主流雷诺数 $Re_g$ 对多斜孔发散冷却结构对流换热系数的影响规律。可以明显看出,主流雷诺数 $Re_g$ 对对流换热系数有较大的影响,随着主流雷诺数的增大,对流换热系数亦逐渐增加,原因很明显,在多斜孔发散冷却结构的起始区域,影响表面对流换热特征的主要因素是由气膜缝槽喷出的冷却气膜,其流动状态与对壁面的气膜覆盖效果是决定对流换热系数的主要因素,在此区域主流的影响居于次要地位。一般而言,主流雷诺数的升高意味着其流速增大,对气膜的夹带作用增强,使气膜的流速亦增大,从而强化了对流换热。同时随着主流雷诺数的增大,主流对发散气膜的压迫作用亦愈来愈大,使得气膜层更加贴壁和稳定,且主流对发散气流的上述两个作用随着主流雷诺数的增大而愈加显著,使冷却结构的对流换热系数变化更加

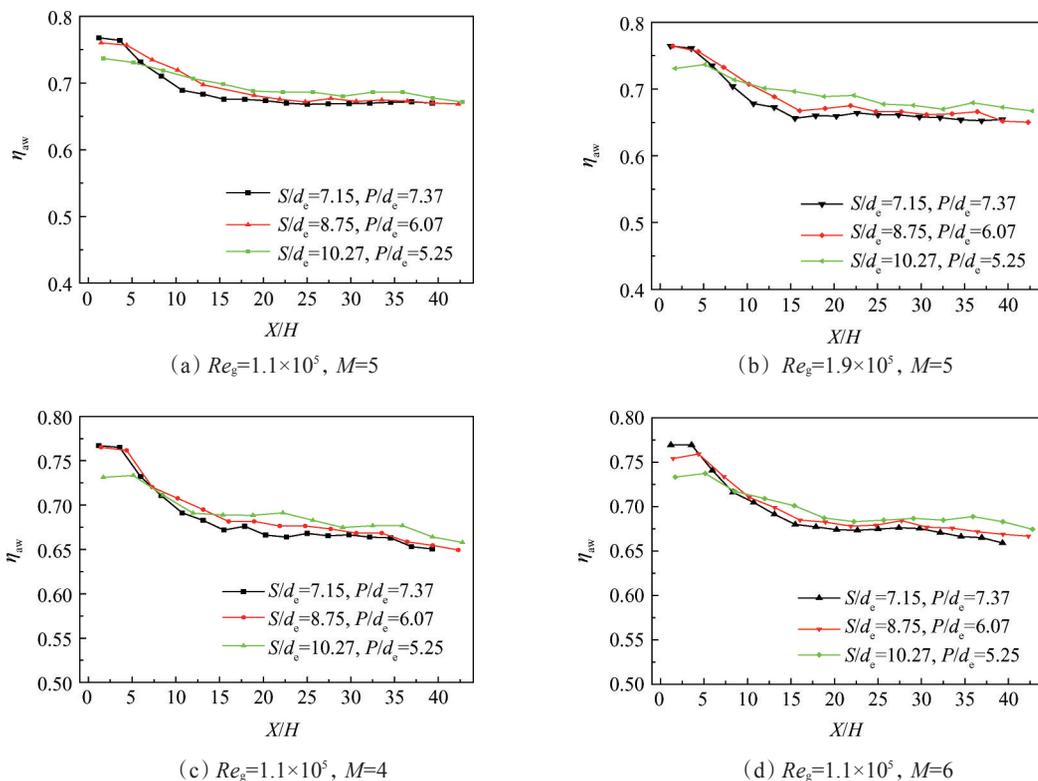


Fig. 8 Comparison of film cooling effectiveness for three test pieces

明显。同时也可以看出,在气膜缝槽出口处,对流换热系数达到了最高,接着沿流动方向逐渐降低,在  $X/H=5$  附近达到最小值,随后对流换热系数沿壁面基本保持不变,维持一定值,在冷却结构的末端,对流换热系数略有增加。分析原因主要是:在气膜缝槽出口处,冷却气流由气膜缝槽高速喷出,气膜温度最低,气膜覆盖最佳,此处具有最高的对流换热系数,随着流动距离的增加,在主流的夹带掺混作用下,一方面气膜层的温度逐渐升高,另一方面气膜层对壁面的覆盖效果逐渐变差,使得对流换热系数逐渐降低,在  $X/H=5$  处达到最小值。随后,发散孔形成的气膜层与热侧壁面间的换热成为了主要影响因素,在  $X/H>5$  的区域,发散气膜保持均匀稳定,故其与壁

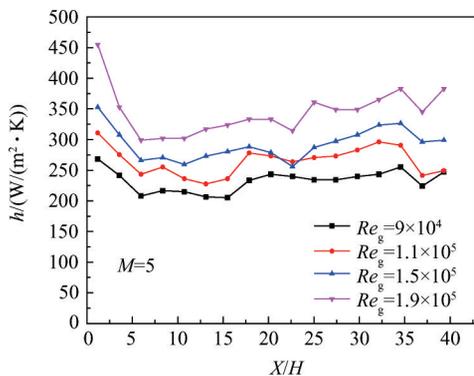
面间的对流换热系数亦保持基本不变。

#### 4.2.2 吹风比对对流换热系数的影响

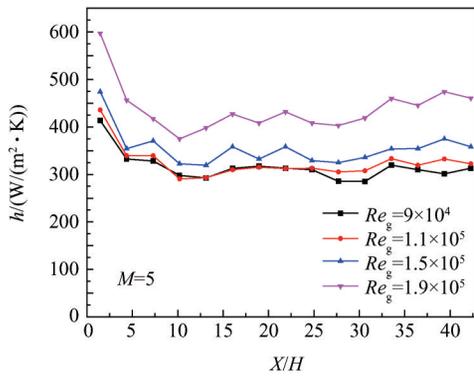
图 10 示出了吹风比对气膜发散组合冷却结构热侧壁面对流换热系数的影响。可以看出,吹风比对三种发散冷却结构对流换热系数的影响规律是一致的,即对流换热系数随着吹风比的增加而升高。这是由于增大吹风比使发散孔冷气出流速度加快,在主流的压迫作用下,冷却射流贴附于壁面,其在壁面附近的流速加快,扰动加强,从而增强了对流换热系数。

#### 4.2.3 三种结构对流换热系数的比较

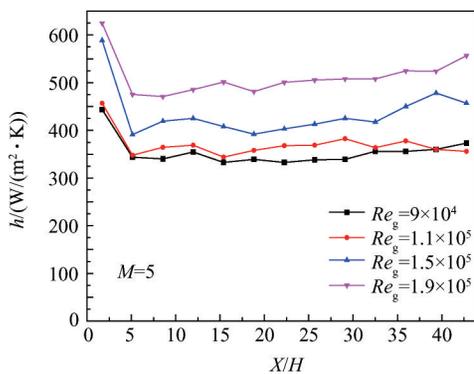
图 11 示出了三种试验板在不同工况下对流换



(a)  $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$

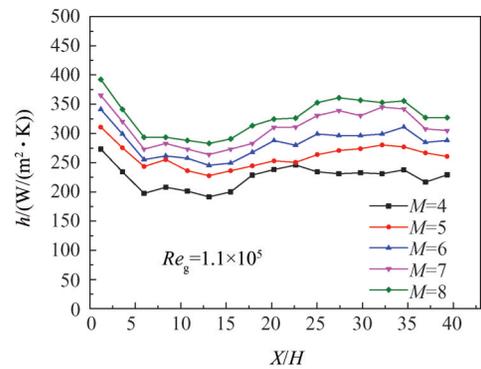


(b)  $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$

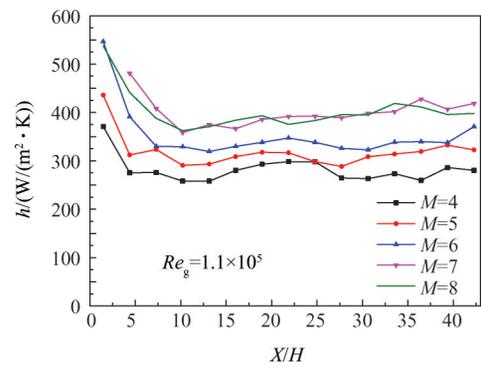


(c)  $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$

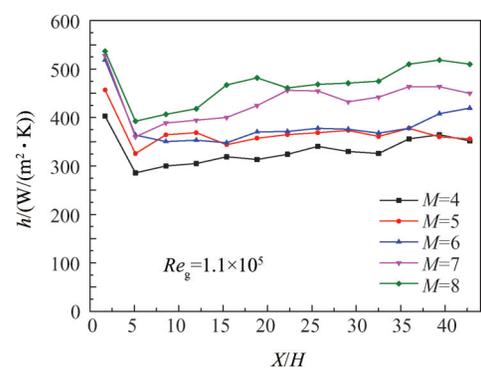
Fig. 9 Effects of  $Re_g$  on convective coefficient



(a)  $S/d_c=7.15, P/d_c=7.37$



(b)  $S/d_c=8.75, P/d_c=6.07$



(c)  $S/d_c=10.27, P/d_c=5.25$

Fig. 10 Effects of blowing ratio on convective coefficient

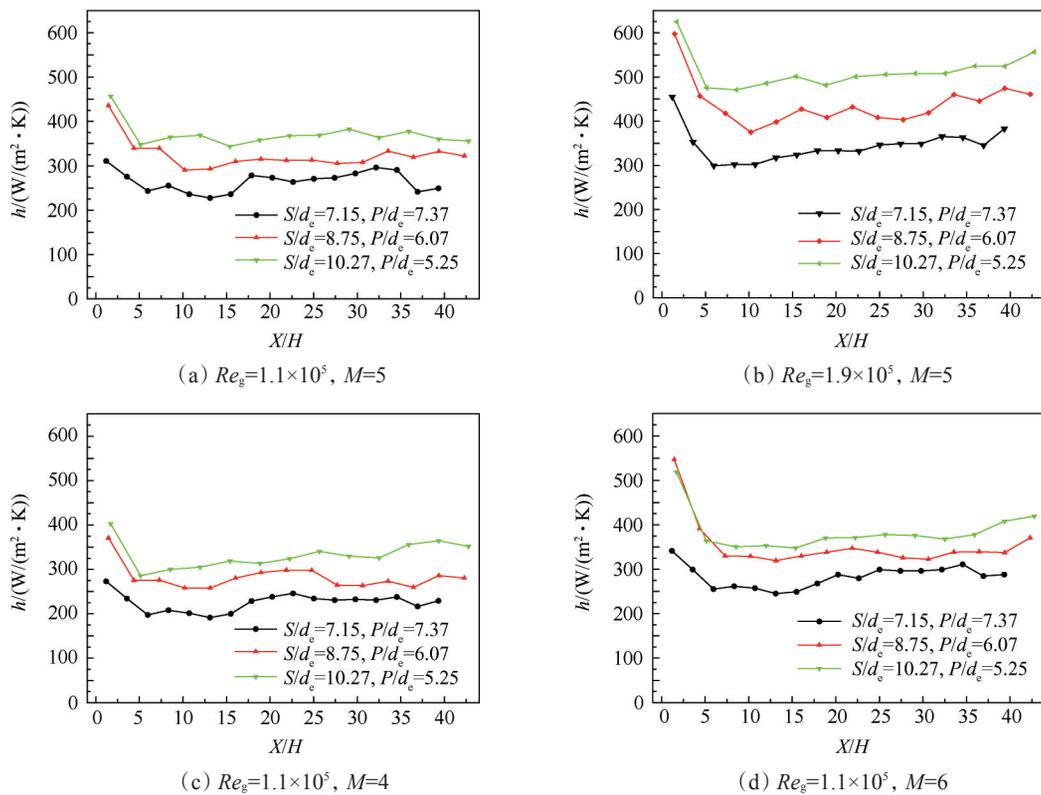


Fig. 11 Comparison of convective coefficient for three test pieces

热系数的对比。可以明显看出,试验板  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的对流换热系数要明显高于其它两种试验板,试验板  $S/d_c=7.15$ ,  $P/d_c=7.37$  的对流换热系数最小,试验板  $S/d_c=8.75$ ,  $P/d_c=6.07$  介于二者之间。原因是试验板  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的发散孔展向间距小,发散孔流出的冷气能够较好地相互叠加,扰动强烈,对流换热效果更好。

## 5 结论

在研究参数范围内,本文主要结论如下:

(1) 气膜发散组合冷却结构绝热冷却效率和通过对流换热系数沿主流方向呈现先逐渐降低,在  $X/H=10$  左右达到最低点,随后沿主流方向冷却效率和通过对流换热系数基本保持不变。

(2) 吹风比对气膜发散组合冷却结构的绝热冷却效率影响不大,但对对流换热系数有较大的影响,随着吹风比的增加,对流换热系数呈现逐渐增加的趋势。

(3) 在本实验主流雷诺数范围内,主流雷诺数对绝热冷却效率的影响不大,但对组合冷却结构的对流换热系数有较大的影响,随着主流雷诺数的增大,对流换热系数亦逐渐增加。对于三种发散冷却结构,试验板  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的对流换热系数要

高于其他两种形式,  $S/d_c=8.75$ ,  $P/d_c=6.07$  试验板次之,  $S/d_c=7.15$ ,  $P/d_c=7.37$  的试验板最低。

(4) 三种试验板的绝热冷却效率分布规律在冷却壁面的不同区域表现出不同的特征,在  $X/H < 10$  的区域,  $S/d_c=7.15$ ,  $P/d_c=7.37$  的试验板绝热冷却效果最好,  $S/d_c=8.75$ ,  $P/d_c=6.07$  的试验板次之,  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的试验板最差;在  $X/H > 10$  的区域内,  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的试验板的绝热冷却效率最大,  $S/d_c=8.75$ ,  $P/d_c=6.07$  的试验板绝热冷却效率次之,  $S/d_c=7.15$ ,  $P/d_c=7.37$  的试验板的绝热冷却效率最小。

(5) 对于三种发散冷却结构,整体而言,  $S/d_c=10.27$ ,  $P/d_c=5.25$  的试验板的对流换热系数和绝热冷却效率要高于其他两种形式,  $S/d_c=8.75$ ,  $P/d_c=6.07$  的试验板次之,  $S/d_c=7.15$ ,  $P/d_c=7.37$  的试验板最低。

## 参考文献:

- [1] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [2] Meller A M. Design of Modern Turbine Combustor [M]. New York: Academic Press Inc., 1990.
- [3] 李彬, 吉洪湖, 江义军, 等. 浮动壁火焰筒壁温试验和计算分析[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2007, 39(6): 771-774.

- [ 4 ] 杨卫华, 彭建勇, 曹俊, 等. 回流燃烧室复合冷却结构冷却效果研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2012, 44(12): 771-774.
- [ 5 ] Yang Wei-hua, Zhang Jing-zhou. Experimental Study of HTC for Film Cooling of Parallel-Inlet Holes [J]. *Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 29(1): 46-53.
- [ 6 ] Rhee D H, Choi J H, Cho H H. Heat (Mass) Transfer on Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling Systems [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2003, 17(1): 95-102.
- [ 7 ] Rhee D H, Choi J H, Cho H H. Flow and Heat (Mass) Transfer Characteristics in an Impingement / Effusion Cooling System with Crossflow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(1): 74-82.
- [ 8 ] Hollwarth B R, Dagan L. Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface, Part 1: Average Heat Transfer [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1980, 102: 994-999.
- [ 9 ] 杨卫华, 王立, 宋双文. 冲击发散冷却流场结构 PIV 测量[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 483-487.
- [ 10 ] Yang Wei-hua, Cao Jun, Shi Rui, et al. Experimental Investigation on Impingement -Effusion Film-Cooling Behaviors in Curve Section [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11-12): 1782-1789.
- [ 11 ] Zhong Fengquan, Brown G. A Three-Dimensional Coupled Heat Transfer Model for Multi-Hole Cooling and Comparisons with Experiments [R]. *AIAA* 2006-595.
- [ 12 ] 李广超, 朱惠人, 白江涛, 等. 气膜孔布局对前缘气膜冷却效率影响的实验[J]. 推进技术, 2008, 29(2): 153-157. (LI Guang-chao, ZHU Hui-ren, BAI Jiang-tao, et al. Experimental Investigation of Film Cooling Effectiveness on Leading Edge with Various Geometries [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(2): 153-157.)
- [ 13 ] 胡娅萍, 吉洪湖. 孔阵排列疏密度对致密多斜孔壁冷却效果的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(1): 28-33. (HU Ya-ping, JI Hong-hu. Effect of Porosity of Holes Array on Cooling Effectiveness of Effusion Cooling [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(1): 28-33.)
- [ 14 ] 林宇震, 李彬, 宋波, 等. 多斜孔壁冷却方式不同进气角度小孔内对流换热研究[J]. 推进技术, 1999, 20(1): 68-72. (LIN Yu-zhen, LI Bin, SONG Bo, et al. Investigation of Convective Heat Transfer Inside Small Holes with Different Inlet Angles in Inclined Multi Hole Wall Film Cooling [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(1): 68-72.)
- [ 15 ] Fric T, Campbell R, Rettig M. Quantitative Visualization of Full-Coverage Discrete-Hole Film Cooling [R]. *ASME* 97-GT-328.
- [ 16 ] 李彬, 胡正义, 林宇震, 等. 多斜孔壁整体冷却效率实验研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(2): 157-160.
- [ 17 ] Facchini B, Coutandin D. Experimental Investigation on the Effects of a Larger Circulating Area on the Performance of an Effusion Cooling Combustor Liner [R]. *ASME* GT 2011-46458
- [ 18 ] Andreini A, Ceccherini A, Facchini B, et al. Combined Effect of Slot Injection, Effusion Array and Dilution Hole on the Heat Transfer Coefficient of a Real Combustor Liner, Part 2: Numerical Analysis [R]. *ASME* GT 2010-22937
- [ 19 ] 杨卫华, 卢聪明, 郑建文. 气膜-发散冷却结构冷却效果的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 517-523.
- [ 20 ] Yang Weihua, Shi Xiaoxiang, Zhang Jingzhou. Experimental Investigation on Film Cooling Characteristics of Ellipse-Shaped Tab [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 81: 277-290.
- [ 21 ] Holman J P. *Experimental Methods for Engineerings* [C]. *New York: McGraw-hill*, 1984.

(编辑:张荣莉)