

各向异性复合材料平板气膜冷却特性 实验和数值研究

侯亚东¹, 单 勇¹, 李江宁², 张靖周¹, 谭晓茗¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对不同编织方式形成的复合材料平板气膜冷却开展了实验研究,利用红外热像仪测量了热侧壁面的温度场分布,分析了平板导热系数、吹风比、主流温度等参数对综合冷却效率的影响。在实验验证的基础上,进一步对单向增韧特点的复合材料进行数值模拟,分析了 X 、 Y 、 Z 三个方向导热系数对单孔气膜冷却壁面温度场分布和综合冷却效率的影响。结果表明:随着吹风比的升高,气膜综合冷却效率升高;随着主流温度的升高,气膜冷却效率降低;2.5D 编织复合材料冷却效率最高,3D 编织复合材料冷却效率最低。各向异性复合材料内部的温度梯度、传热量都与材料的导热系数特征有关, X 方向和 Z 方向的导热系数增大,沿程综合冷却效率升高;而 Y 方向导热系数的增大对气膜冷却效率几乎没有影响。

关 键 词: 气膜冷却; 各向异性复合材料; 吹风比; 综合冷却效率; 导热系数

中图分类号: V21

文献标志码: A

Experimental and numerical studies on the film cooling characteristics of anisotropic composite plates

HOU Yadong¹, SHAN Yong¹, LI Jiangning²,
ZHANG Jingzhou¹, TAN Xiaoming¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Experimental studies were carried out on the film cooling of the composite plates formatted through different weaving modes. An infrared radiation camera was used to capture the temperature distributions on hot side wall, and the effects of thermal conductivity, blowing ratio, and mainstream temperature on the overall cooling effectiveness were analyzed. Numerical simulations on the anisotropic composite plates with a single film hole were further conducted to explore the individual influence of thermal conductivity along the X , Y , and Z directions on the wall temperature distribution as well as the overall cooling effectiveness. Results show that the film cooling effectiveness increases with the enhancement of the blowing ratio and decreases with the increase of the main stream temperature. Among the

收稿日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(51306088)

作者简介: 侯亚东(1990—),男,硕士生,主要从事航空发动机传热传质的研究。

引用格式: 侯亚东,单勇,李江宁,等. 各向异性复合材料平板气膜冷却特性实验和数值研究[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2384-2393. HOU Yadong, SHAN Yong, LI Jiangning, et al. Experimental and numerical studies on the film cooling characteristics of anisotropic composite plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2384-2393.

three anisotropic composite plates, 2.5D composite plate produces the highest film cooling effectiveness while 3D composite plate gives the lowest cooling effectiveness. The increase of thermal conductivity along X and Z directions can improve the film cooling efficiency while the increase of thermal conductivity along Y direction has little influence on the film cooling efficiency.

Key words: film cooling; anisotropic composite material; blowing ratio; overall film cooling effectiveness; thermal conductivity

随着先进航空发动机整体性能的逐步提升、推质比的不断提高,涡轮前进口燃气温度也随之提高,已经达到 1800 K 以上,这样的温度已经远远超出涡轮金属叶片的承受范围^[1-3]。此外,发动机中的另一个高温部件,燃烧室也面临着新的冷却结构或新材料应用的挑战^[4]。以往,在热端部件强化冷却方面,气膜冷却技术的关注点集中在气膜孔型、孔径、吹风比等参数的耦合设计上,以期达到提高冷却效率、优化表面温度场分布等。例如,杨成凤等^[5]通过对不同吹风比下正菱形、长菱形和超长菱形 3 种气膜孔阵列方式的多孔全覆盖气膜冷却的绝热冷却效率进行数值模拟,结果表明:气膜孔阵列超长菱形排布是较优的排布方案,该方案下气膜绝热冷却效率相对最高。王湛等^[6]分析了带圆孔的平板冷却结构的热应力特性,结果表明:平板内整体热应力远小于气膜孔周边的热应力,热应力主要集中在孔前缘线和尾缘线附近,而气膜孔两侧的热应力仍保持较低的水平。近年来,得益于越来越多的耐高温复合材料在航天中得到广泛使用^[7-11],国内外学者针对各向异性复合材料的气膜冷却开展了一些研究工作。张均峰等^[12]通过对不同尺寸冷却通道的主动冷却复合材料薄壁燃烧室结构瞬态传热特性进行模拟,结果表明:在充分发挥煤油冷却效果前提下,冷却通道距离燃烧室内壁距离越近,所需煤油体积流量越大。彭丽娜等^[13]针对一种使用陶瓷基耐高温复合材料的主动冷却模式开展了实验和数值研究,结果表明:基于 C/SiC 复合材料的多层材料主动冷却结构在高温高热流环境中的冷却能力较强,可以在使用较少冷却剂的条件下使发动机壳体内部的温度保持在可靠工作的范围内。Wadia^[14]研究了多孔壁冷却结构和金属基复合材料多斜孔冷却结构,结果表明陶瓷厚度和涂层厚度对燃烧室内外壁面的温度分布有很大影响。Zhong 和 Brown^[15]对一个三维耦合多孔冷却模型进行直接的数值模拟,发现在吹风比为 0.25 和 0.43 的时候,陶瓷基复合材料板的孔内部冷却和

板背面冷却是主要的冷却方式。李典森等^[16]通过数值模拟研究了三维五向编织方式的复合材料导热性能,分析了横、纵导热系数随编织角变化的关系。张建可^[17]研究了树脂基碳纤维复合材料热导与各种纤维体积含量及温度的关系,指出:树脂基碳纤维复合材料的导热系数在中温区 100~400 K,随着碳纤维体积分数的增加而增大;在 100 K 以下,变化较小;在极低温区变化消失;平行于纤维排布方向的导热系数一般要大于垂直于纤维排布方向的导热系数。马青松等^[18]分析了 C/SiC 复合材料在超燃冲压发动机中的应用,总结了 C/SiC 复合材料在主动冷却结构中应用的进展情况。陈洁等^[19]计算了单向 C/C 复合材料导热系数,对 C/C 复合材料的热性能、结构进行设计,为复合材料的热力计算提供有效的模型和数学依据。

以上文献说明了复合材料在高温部件主动冷却应用中不仅仅与冷却结构、冷气参数有关,更为重要的是各向异性的复合材料的选取、纤维的含量以及编制方式都决定了材料的导热系数各向异性的物理属性,从而影响其冷却特性。然而,针对复合材料,在各方向导热系数的差异造成冷却特性差异方面的研究却很缺乏。就此,本文针对不同编织方式的 SiC/SiC 平板复合材料实验件进行气膜冷却特性的实验研究,利用红外热像仪对热侧壁面的温度场进行细致的测量、分析复合材料的气膜冷却效果。用经过实验数据验证的数值策略,模拟各向异性的单向增韧复合材料的气膜冷却,分析不同方向的导热系数变化对其综合冷却效率的影响。

1 实验系统与实验件

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,主要由空气压缩机、主流通道、单管燃烧室、二次流管道、流量计(槽道流量计、浮子流量计)和红外壁温测试系统等部件组成。

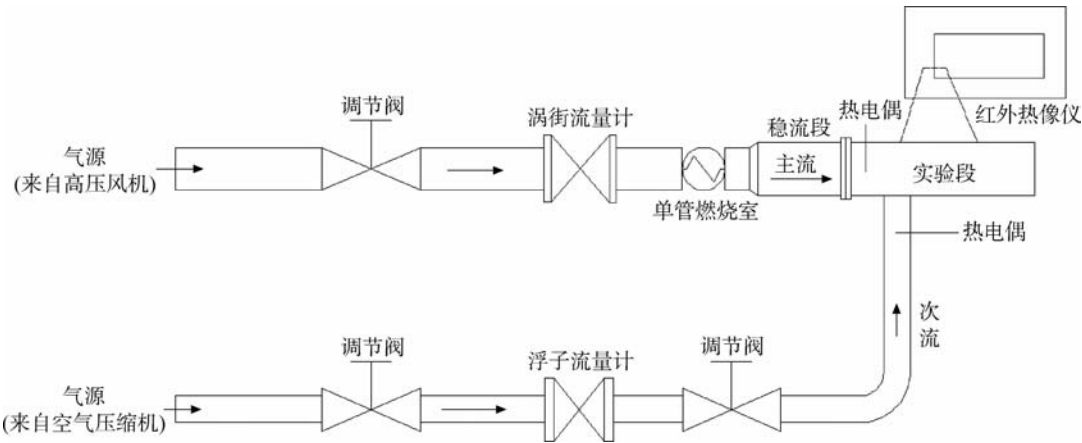


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Scheme of experimental system

环境空气由高压风机驱动进入主流管道,其流量由槽道流量计测量,通过单管燃烧室加热,使主流的温度加热到实验所需温度,然后经过稳流段进入到实验段;二次流(冷却空气)则是由另外一台空气压缩机提供,其流量由浮子流量计测量,然后进入实验段。

实验段如图 2 所示,包括主流通、次流通、气膜平板构成。气膜平板沿着流动方向布置 27 排气膜孔,孔直径为 $D=1\text{ mm}$,孔倾角均为 45° 。实验段主流入口截面的尺寸(长 $\times$ 宽)为 $104\text{ mm}\times 65\text{ mm}$;次流入口截面的尺寸(长 $\times$ 宽)为 $104\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ 。本实验采用红外热像仪来拍摄气膜平板热侧壁表面的温度场,故在实验段壁面上开有安装红外玻璃的红外测试窗口。实验的主流温度通过在实验段主流进口处的热电偶测得,热电偶布置在横截面的中心位置处,精度为 $\pm 0.4\%$;冷气温在冷气进口处布置的热电偶测得,热电偶布置在横截面中心处,精度为 $\pm 0.4\%$ 。实验段的主、次流进口处安装了压力探针以测量主、次流进气压力。

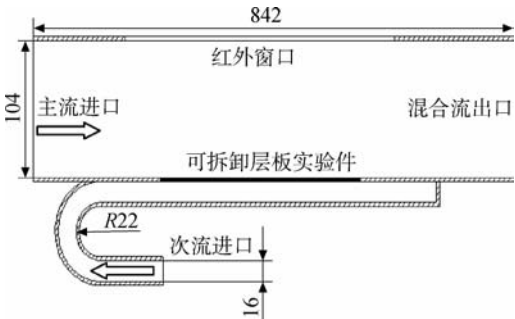


图 2 实验段示意图(单位:mm)

Fig. 2 Scheme of experimental measurements

(unit:mm)

1.2 数据处理方法

吹风比的定义为

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_g u_g} = \frac{\dot{m}_c / A_c}{\dot{m}_g / A_g} \tag{1}$$

式中 $\dot{m}_c$ 为次流流量, A_c 为次流孔通道横截面积, $\dot{m}_g$ 为主流流量, A_g 为主流通横截面积。根据吹风比不确定度分析,吹风比的最大相对误差为 3%。

综合气膜冷却效率的定义为

$$\eta = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c} \tag{2}$$

式中 T_g 为主流温度, T_w 为壁面温度, T_c 为次流温度。根据不确定度分析,平均综合冷却效率的最大相对误差为 2.24%。

1.3 复合材料编制方法

2D 编织方式形成的结构就是平板波纹层叠结构,是将经纱和纬纱相互垂直方向放置,相互交错编织,层状叠加编织而成,结构如图 3 所示。

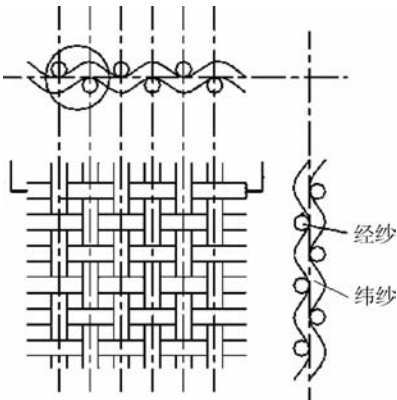


图 3 2D 平板结构示意图

Fig. 3 Structural scheme of 2D composite plates

2. 5D 编织方式有很多,本次实验所采用的编织方式是浅交弯联 2. 5D 结构。图 4 是浅交弯联 2. 5D 编织实物示意图,图中弯曲线条是经纱,直线是纬纱。编织结构中的经纱是按照近似于正弦曲线排布,将经纱系统垂直悬挂起来,按照设计的行与列对经纱进行初始排布,然后把经纱按设计好的运动规律互相进行位置变换,每变换一次位置,引一次纬纱,从而实现经纱和纬纱的一次“交织”,根据设定的结构,变换若干次经纱位置并引入相应的纬纱后完成一个完整运动循环,经纱和纬纱实现了多次“交织”,完成一个完整的结构单元,重复以上运动循环,直到编织完成为止。

3D 编织方式有很多,实验用的复合材料是三维四向编织方式,采用四部编织方法来实现的,编织纱束由锭子携带,按照按照预成型件的截面形态排列,锭子的运动分为 4 步:①不同行的携纱器相互交替地运动一个位置;②不同列的携纱器相互交替地运动一个位置;③运动方向与第 1 步相反;④运动方向与第 2 步相反;以上 4 步构成了一个机器循环,然后沿纵向打紧,使纱线之间彼此接触并保持稳定,此时经过一个循环后所形成的预成型体的长度为一个编织花节长度。复上述运动,在编织机机床上形成具有某种截面的三维编织预制件。图 5 是三维四向编织方式实物结构示意图。

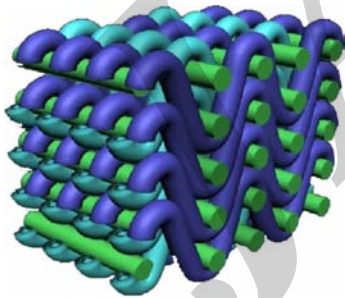


图 4 2. 5D 编织示意图
Fig. 4 Scheme of 2. 5D weave

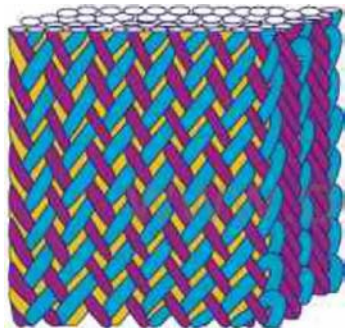


图 5 3D 编织示意图
Fig. 5 Scheme of 3D weave

实验用的复合材料板的纤维和基体都是 SiC,碳化硅基体的导热系数约 $10.8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,碳化硅纤维的导热系数约 $11.63\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

2 实验结果与分析

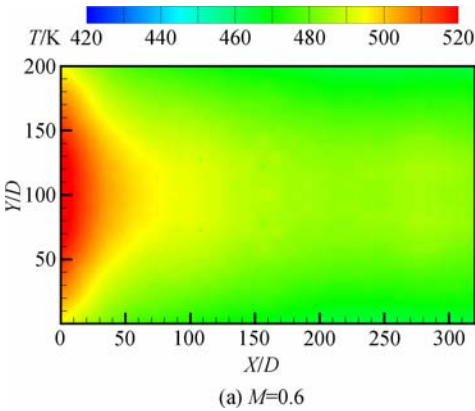
2. 1 吹风比影响

选取 2. 5D 编织方式的复合材料平板模型,对其进行不同吹风比条件下的气膜冷却实验。表 1 是实验参数条件。

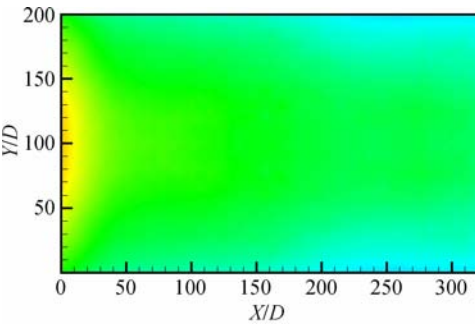
表 1 复合材料平板气膜实验工况
Table 1 Experimental condition of composite plates

M	$m_c/(\text{kg}/\text{s})$	T_c/K	T_g/K
0. 6	0. 005 8	300	700
1. 0	0. 009 8	300	700
1. 5	0. 014 7	300	700
2. 0	0. 019 5	300	700
2. 5	0. 024 4	300	700

图 6 是在主流温度为 700 K、次流温度为 300 K 下,2. 5D 编织方式的复合材料平板在吹风比 $M=0. 6、1. 0、1. 5、2. 0、2. 5$ 的温度分布情况。从图中可以看出:随着吹风比的升高,复合材料平板的温度逐渐下降。这是因为低温次流高速通过



(a) $M=0.6$



(b) $M=1.0$

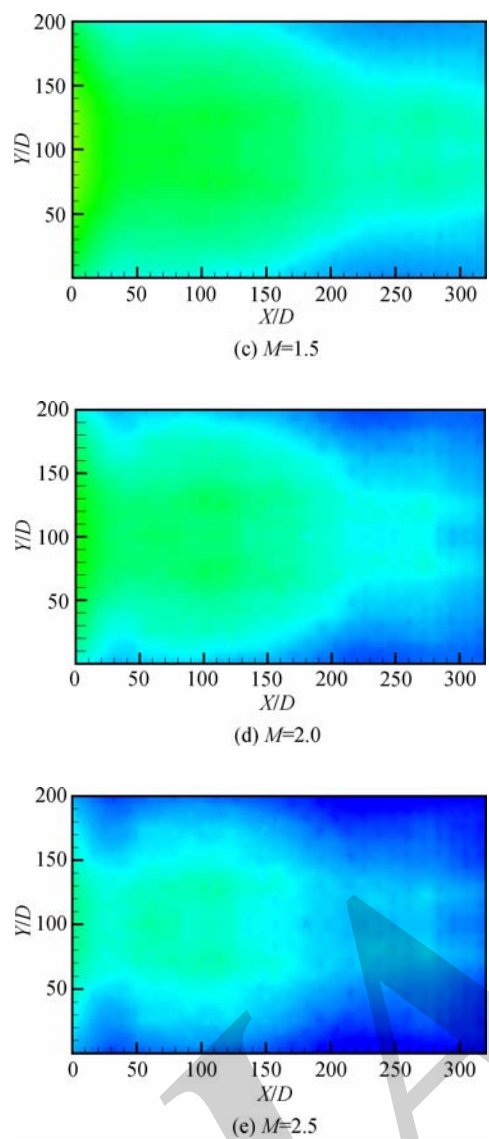


图 6 不同吹风比下的平板表面温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of plate surface under different blowing ratios

斜孔形成气膜,覆盖在平板热侧壁面的表面,有效地隔离了主流与平板热侧壁面,避免被冷却壁面与高温主流的直接接触,减少壁面与高温主流气流之间的对流换热。吹风比达到 2.5 时,其表面温度都降低到 430 K 以下。即便是小吹风比条件,表面最高温度也在 520 K 以下。同时,在气膜冷却叠加效应的影响下,沿着流动方向的壁面温度逐渐降低。

图 7 是在主流温度为 700 K、次流温度为 300 K 下,2.5D 编织方式的复合材料平板在不同吹风比下的沿程综合冷却效率。可以看出:在同一吹风比下,综合冷却效率沿流向逐渐升高,因为平板下游不仅受到当前位置气膜冷却的影响,同时也受到上游气膜叠加的冷却作用,使下游平板

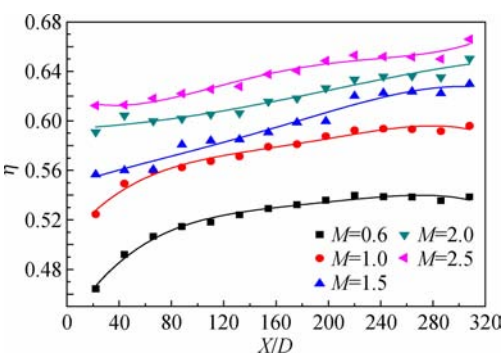
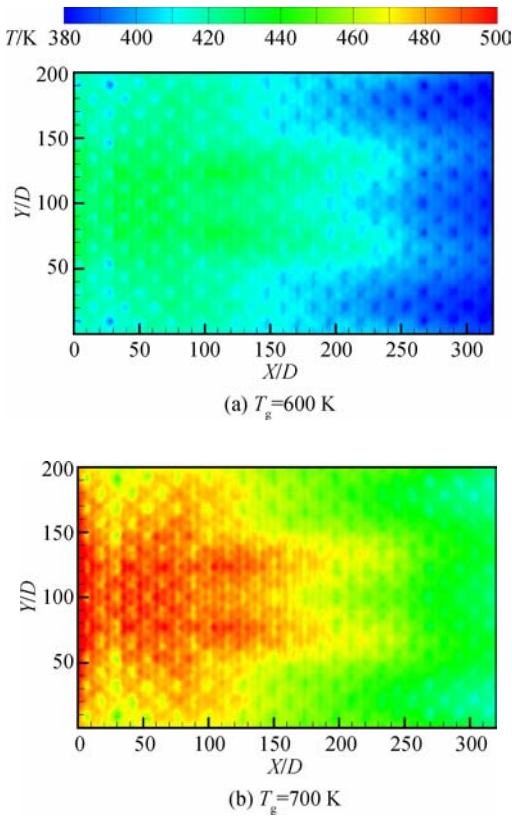


图 7 不同吹风比下的综合冷却效率分布
Fig. 7 Overall film cooling effectiveness varying with blowing ratio

温度较上游更低;同时随着吹风比地升高,相应位置的综合冷却效率也在逐渐升高。另外,可以发现:随着吹风比的升高,虽然沿程平均冷却效率在不断提高,但是升高幅度在减小,因为随着次流流量升高,气膜也在逐渐远离热侧壁面,对冷却效率的提升也有一定的相反作用。

2.2 主流温度的影响

选取 2D 编织方式的复合材料作为考察对象,在保持吹风比 $M=2.0$ 、次流温度 300 K 的情况下,分别在 3 种主流温度为 600、700、750 K 进行气膜冷却实验。图 8 给出了主流温度 600、700、750 K 情况下,平板壁面的温度分布。从图



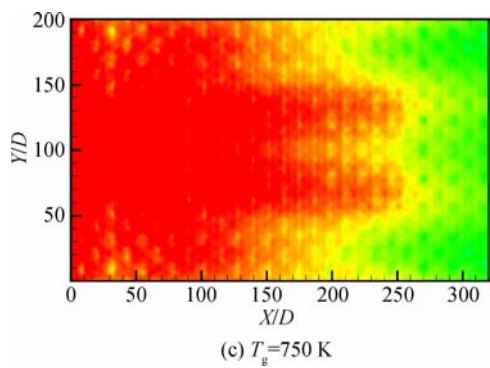


图 8 不同主流温度的平板表面温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of plate surface varying with main stream temperature

中可以看出:随着主流温度的升高,平板热侧壁面温度均升高,这是因为主流温度的升高直接影响热侧壁面热量的交换。即使吹风比和冷气温度都保持不变,主流和壁面、次流间的温差的增加,导致换热热量增加,从而壁面温度升高,综合冷却效率下降。

图 9 是主流温度为 600、700、750 K 情况下,平板壁面沿程展向综合冷却效率分布。从图中可以明显看到:在次流温度不变情况下,随着主流温度的升高,综合冷却效率也是逐渐下降的。原因在于:一方面,在吹风比不变的情况下,主流温度的升高直接影响主流与气膜层之间的对流换热,使对流换热热量增大,热侧壁面的温度升高;另一方面,由于平板的导热,孔壁面与孔内二次流之间的对流换热也得到加强,使得孔出口处二次流的温度升高,低温气膜的温度升高,不利于气膜对热侧壁面的冷却作用。

2.3 编织方式的影响

选取编织方式分别为 2D、2.5D、3D 的复合材料平板进行气膜冷却对比实验,主流温度为

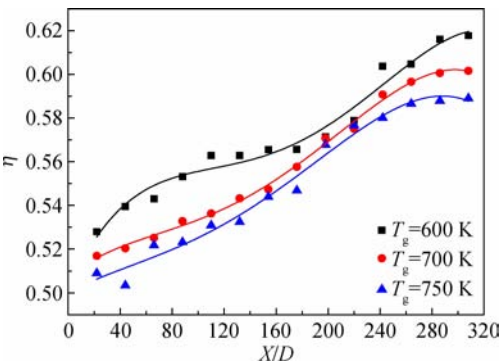


图 9 不同主流温度下的综合冷却效率分布

Fig. 9 Overall film cooling effectiveness varying with main stream temperature

700 K、次流温度为 300 K,吹风比为 1.0。图 10 是在上述实验条件下,平板表面综合冷却效率分布。从图中可以看出:对于不同编织方式的复合材料板来说,综合冷却效率从高到低依次是 2.5D 板、2D 板、3D 板。

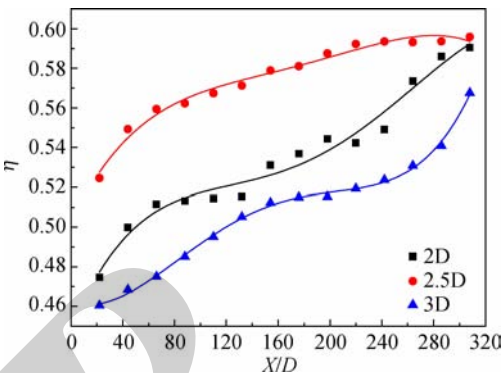


图 10 不同材料的综合冷却效率

Fig. 10 Overall film cooling effectiveness for different materials

3 数值模拟的验证

选取 2D 编织方式的复合材料平板气膜冷却模型,按照实验的条件对实验模型进行数值模拟,主流温度为 600 K,次流温度为 300 K,吹风比 0.6。采用 $k-\omega$ shear stress transport (SST) 模型,复合材料 X、Y、Z 共 3 个方向导热系数分别为 40、4、4 W/(m · K)。数值模拟计算模型结构如图 11 所示,采用非结构化网格,在孔区域处加密,总体网格量 961 万,如图 12 所示。

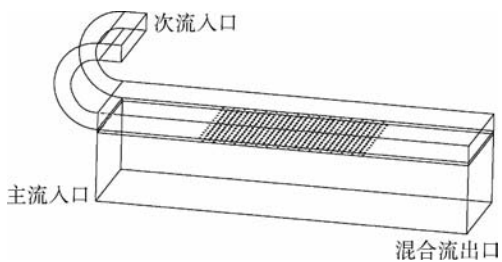


图 11 计算模型结构示意图

Fig. 11 Schematic of calculation model structure



图 12 整体网格示意图

Fig. 12 Computation mesh

图 13 是 2D 复合材料平板沿程综合冷却效率的实验和数值模拟对比。可以看出:数值模拟结果和实验值的曲线走势基本相同;当 $X/D < 100$ 时,实验值大于数值模拟结果,最大误差 20%;当 $X/D > 100$ 时,数值模拟结果大于实验值,最大的绝对误差 9%。两者产生误差的主要原因是主流的热量传递到气膜平板后,一些热量以导热的方式从与气膜平板四周接触的端壁传递到实验段壁面,再辐射到环境中;而数值模拟是没有考虑到这部分热量的损失。故而实验曲线沿着流向更平滑。

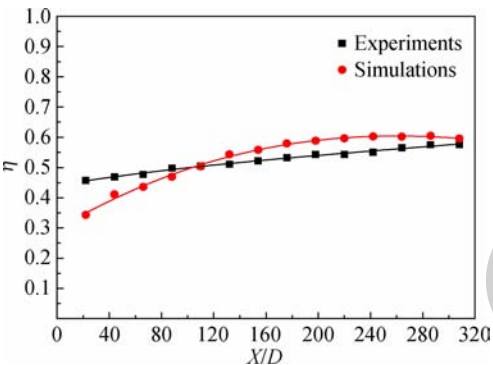


图 13 气膜冷却实验和数值模拟结果对比
Fig. 13 Comparison of experimental and numerical results of film cooling

4 材料导热系数影响的数值分析

为了进一步分析各向异性复合材料的导热系数对气膜孔下游壁面温度和综合气膜冷却效率的影响,分别模拟气膜平板 X 、 Y 、 Z 三个方向在不同导热系数下的冷却特性。气膜孔倾斜角度为 20° ,直径 D 为 1 mm;主流温度为 1850 K,流量为 30.06 g/s;次流温度为 800 K,次流流量为 1.376 g/s;导热系数各向异性气膜平板的厚度为 1.8 mm,如图 14 所示。

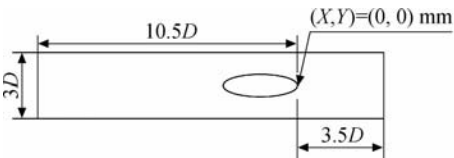


图 14 特征区域示意
Fig. 14 Schematic diagram of characteristic zone

4.1 X 方向导热系数的影响

根据文献[19],复合材料的导热系数的变化范围较大,故本文从导热系数从量级十变化到量

级几百。假设纤维增韧的方向是沿流动方向,改变 X 方向的导热系数,分别选取了 4、40、240、440 $W/(m \cdot K)$, Y 方向和 Z 方向的导热系数均为 4 $W/(m \cdot K)$ 不变。

图 15 是变 X 方向导热系数条件下的各向异性平板气膜孔出口局部特征区域 I ($X/D = -10.5 \sim 3.5$) 的温度云图。可以明显看到等温线的分布以及温度值随着导热系数的变化而发生改变。一方面,随着 X 方向导热系数的增加,等温线越来越平行于 X 方向,说明在 X 方向上温度梯度越来越小;另一方面,随着 X 方向导热系数的增加,孔下游附近的低温区域逐渐减小,这说明仅仅 X 方向导热系数的增加,能够增加强平板 X 方向的导热能力,下游高温壁面的热量更多的传递到气膜孔附近。换言之,在 X 方向温度扯平的能力增强了。

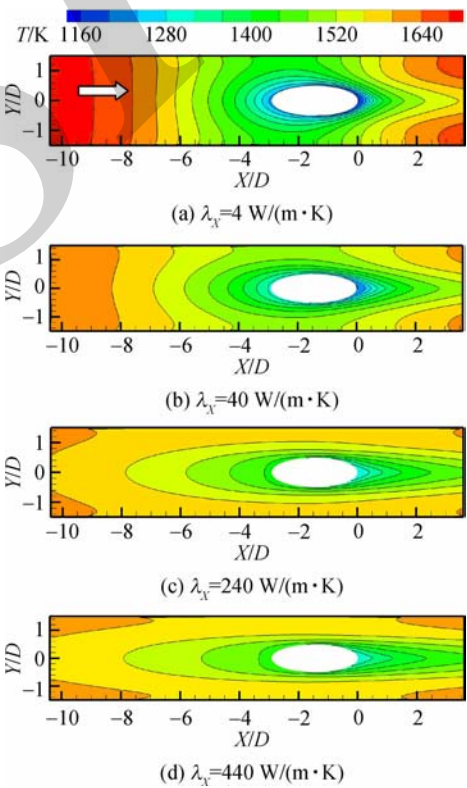


图 15 变 X 方向导热系数的壁面温度分布
Fig. 15 Wall temperature distribution under different X -directional thermal conductivity

图 16 给出了变 X 方向导热系数条件下的壁面沿程平均综合冷却效率。可以发现:相对于导热系数各向同性的平板,各向异性给气膜冷却效率带来的影响是非常显著的,例如: X 方向导热系数从 4 $W/(m \cdot K)$ 增加到 40 $W/(m \cdot K)$,气膜

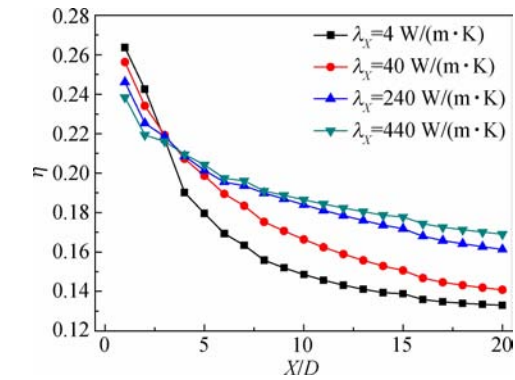


图 16 变 X 方向导热系数下的综合冷却效率

Fig. 16 Overall film cooling effectiveness under different X-directional thermal conductivity

孔出口 $X/D=1$ 位置的冷却效率从 0.27 降低到 0.24,在 $X/D=20$ 位置的冷却效率从 0.10 提高到 0.17。总体上,在 X/D 小于 3 区域范围内,随着 X 方向导热系数的增加,该区域的综合冷却效率是降低的,但是在导热系数增加到 $40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以后,降幅不明显。这一点也可从图 16 的温度场分布特征看出,孔下游附近低温区域的温度随着 X 方向导热系数的增加而增加。在 $X/D=3$ 的位置,沿程综合冷却效率的变化规律发生转折。在 $X/D>3$ 时,沿程综合冷却效率是随 X 方向导热系数的增加而得到提高的。这是因为在 X 方向导热系数的增加的情况下,虽然气膜孔附近的壁面温度增加了,但是其下游,尤其是 $X/D>3$ 的下游区域壁面温度降低了。

4.2 Y 方向导热系数的影响

通过单独改变 Y 方向的导热系数,分别选取 4、40、240、440 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而 X 方向和 Z 方向导热系数保持为 $4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 不变。图 17 给出了变 Y 方向导热系数下复合材料平板热侧壁面特征区域的温度分布。从图中可以看出:随着 Y 方向导热系数的增大,等温线越来越平行于 Y 轴,同时在孔横向区域内,可以看到温度的等值线越来越饱满,是 Y 方向的导热量增加所致。

图 18 中给出了不同 Y 方向导热系数下壁面沿程展向的综合冷却效率。 Y 导热系数从 $4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,沿程展向综合冷却效率仅仅提高了 5% 不到;当 λ_y 继续增大,沿程展向综合冷却效率几乎不变。虽然 Y 方向上的温度梯度由于导热系数的增加而减小, Y 方向的温度分布也更加均匀,但是沿程展向平均壁面温度并没有明显的改变,对综合冷却效率没有太大改变。

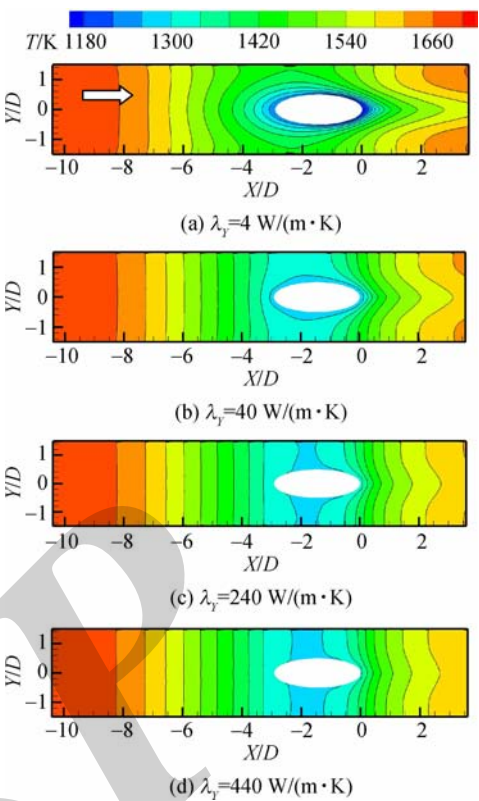


图 17 变 Y 方向导热系数下的壁面温度分布

Fig. 17 Wall temperature distribution under different Y-directional thermal conductivity

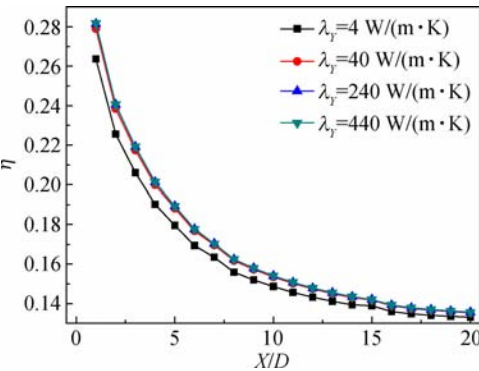


图 18 变 Y 方向导热系数下的综合冷却效率

Fig. 18 Overall film cooling effectiveness under different Y-directional thermal conductivity

4.3 Z 方向导热系数的影响

仅仅改变 Z 方向的导热系数,分别选取了 4、40、240、440 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而 X 方向和 Y 方向导热系数均保持为 $4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 不变。

图 19 给出了变 Z 方向导热系数下复合材料平板热侧壁面特征区域的温度分布。从图中可以看出:随着 Z 方向导热系数的增大,热侧壁面孔出口上游的低温区域逐渐增大,同时在孔出口上

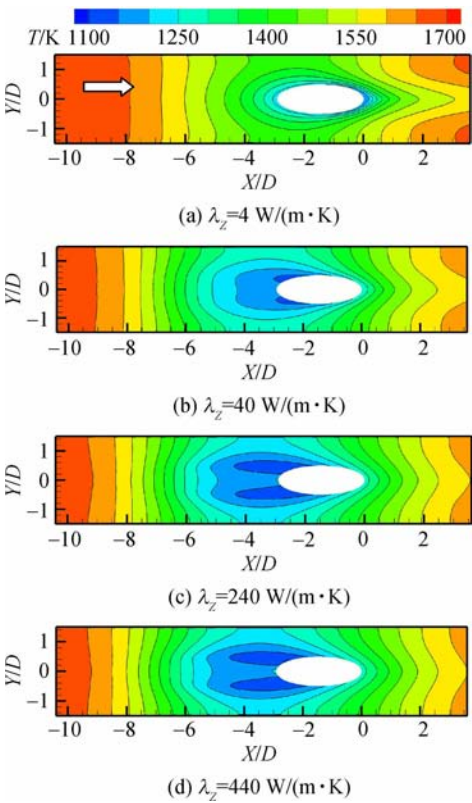


图 19 变 Z 方向导热系数下的壁面温度分布
Fig. 19 Wall temperature distribution under different Z -directional thermal conductivity

游两侧出现两个椭圆形低温区,这是因为随着 Z 方向导热系数的增大,孔出口上游区域 Z 方向孔内冷流体与孔壁面对流换热热量增大,同时 Z 方向导热系数的增大,能够增强平板 Z 方向的导热能力,平板 Z 方向的温度梯度分布更加均匀,导致低温区出现,这些在图 20 中可以更加直观看出来。

图 20 给出了通过孔中心的板内部面的温度分布。从图中可以看出:随着 Z 方向导热系数的增大,板内部的等温线越来越平行于 Z 方向,说明 Z 方向的温度梯度越来越小,板内 Z 方向温度分布更加均匀;这样就导致热侧壁面孔出口上游区域的温度逐渐降低,出现显著的低温区。

图 21 中给出了变 Z 方向导热系数下壁面沿程展向的综合冷却效率。相对于导热系数各向同性的平板,各向异性对气膜冷却效率的影响是十分显著的, Z 方向导热系数从 $4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,沿程展向综合冷却效率提高了 10%。当 λ_z 继续增大,沿程展向综合冷却效率还在继续升高,但升高幅度在减小。这是因为 Z 方向导热系数的增加,能够增强板内 Z 方向的导热,热侧壁面与主流之间的对流换热热量主要被导热传递到冷侧,热侧壁面温度也随着小幅下降,综

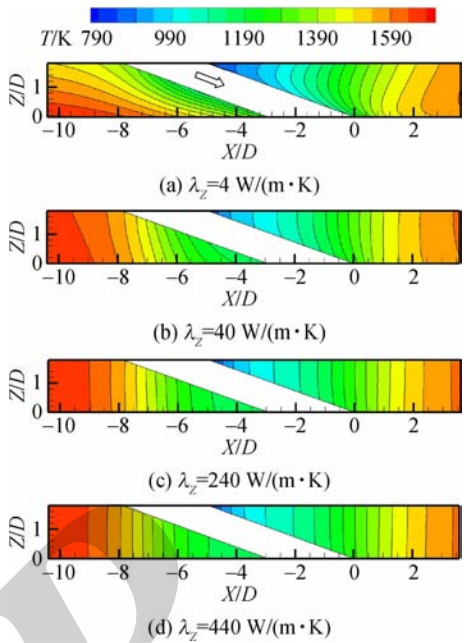


图 20 变 Z 方向导热系数下的平板内部温度分布
Fig. 20 Plate interior surface temperature distribution under different Z -directional thermal conductivity

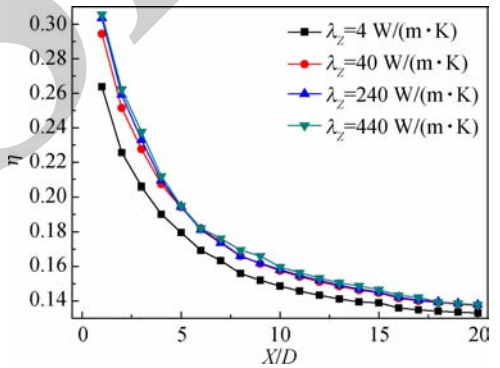


图 21 不同 Z 方向导热系数下的综合冷却效率
Fig. 21 Overall film cooling effectiveness under different Z -directional thermal conductivity

合冷却效率也会升高。

5 结 论

对于平板气膜冷却,除了吹风比、主流温度比、孔径、孔型等众多因素外,材料的导热系数及其各向异性程度也是一个不可忽视的影响气膜综合冷却效率的因素。通过复合材料气膜冷却实验和拓展的数值仿真,得到以下主要结论:

1) 对于不同编织方式形成的复合材料平板来说,在同一实验条件下,二维编织的复合材料平板的综合冷却效率最高,2.5 维编织的复合材料次之,三维编织的复合材料平板最低。

2) 对于单向增韧的各向异性复合材料,数值

结果表明:导热系数的变化改变了平板壁内的温度分布和温度梯度分布,从而带来了某个方向的热传递量的增加或减少。随着 X 方向的导热系数的增大,在 X/D 小于 3 区域内,平板的综合冷却效率降低,在 $X/D>3$ 区域内,平板的综合冷却效率升高;随着 Y 方向导热系数的增大,平板的热侧壁面平均壁面温度没有很大改变,综合冷却效率几乎不变;随着 Z 方向导热系数的增大,平板的综合冷却效率升高。

参考文献:

[1] 基耶韦尔. 现代涡轮喷气发动机的燃烧[M]. 杜增源,译. 北京:国外航空出版社,1975.

[2] 刘捷,韩振兴,蒋洪德,等. 不同复合角对平板气膜冷却特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(8):1311-1315.

LIU Jie, HAN Zhenxing, JIANG Hongde, et al. Experimental research on flat plate film cooling effectiveness at different complex angles[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2008,29(8):1311-1315. (in Chinese)

[3] GRISCH M, SCHULZ A, WITTING S. Adiabatic wall effectiveness measurement of film-cooling holes with expanded exits[J]. Journal of Turbomachinery,1998,120(3):549-556.

[4] 张勃,吉洪湖,杨芳芳,等. 多斜孔壁与机加环气膜冷却燃烧室的壁面换热特性数值研究[J]. 航空动力学报,2012,27(4):832-836.

ZHANG Bo,JI Honghu,YANG Fangfang,et al. Numerical investigation of heat transfer characteristics of effusion cooling and machinery film cooling combustors[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(4):832-836. (in Chinese)

[5] 杨成凤,张靖周,杨卫华. 全覆盖气膜孔阵列方式对冷却特性的影响[J]. 航空动力学报,2010,25(7):1524-1529.

YANG Chengfeng, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Effect of holes array arrangement on the full coverage film cooling characteristic[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(7):1524-1529. (in Chinese)

[6] 王湛,张超,刘建军. 平板圆孔气膜冷却的热弹耦合分析[J]. 航空动力学报,2015,30(6):1298-1306.

WANG Zhan,ZHANG Chao,LIU Jianjun. Thermo-elastic coupling analysis of round-hole flat-plate film-cooling[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(6):1298-1306. (in Chinese)

[7] GLASS D E. Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles I[R]. AIAA-2008-2682,2008.

[8] SOMMERS A, WANG Q, HAN X. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems; a review[J]. Applied Thermal Engineering,2010,30(11):1277-1291.

[9] KOZLOV A AVOROBIEW A GBOROVIK I N, et al. Development liquid rocket engine of small thrust with combustion

chamber from carbon-ceramic composite material[M]. Rijeka, Croatia:INTECH Open Access Publisher,2011.

[10] AKASHI T, TAKESHI N, KOOM T. Research of CMC application to turbine components[J]. Engineering Review,2005,38(1):58.

[11] BARNARD P, HENDERSON M B, RHODES N. CMC integration and demonstration for gas turbine engines (CINDERS)[J]. Applied Thermal Engineering,2004,24(11):1755-1764.

[12] 张均峰,牡丹,卞祥德. 复合材料主动冷却薄壁燃烧室设计分析[J]. 航空动力学报,2013,28(11):2401-2407.

ZHANG Junfeng, MU Dan, BIAN Xiangde. Design analysis of active cooling composite combustion chamber with thin wall[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(11):2401-2407. (in Chinese)

[13] 彭丽娜,何国强,刘佩进,等. 耐高温复合材料的主动冷却实验[J]. 宇航学报,2008,29(5):1668-1672.

PENG Lina, HE Guoqiang, LIU Peijin, et al. Experiments and numerical simulation of active cooling ceramic matrix composite[J]. Journal of Astronautics,2008,29(5):1668-1672. (in Chinese)

[14] WADIA A R. Advanced combustor liner cooling technology for gas turbines[J]. Defence Science Journal,2014,38(4):363-380.

[15] ZHONG Fengquan, BROWN G L. A 3-dimensional, coupled, DNS, heat transfer model and solution for multi-hole cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(7):1328-1343.

[16] 李典森,卢子兴,刘振国,等. 三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析[J]. 航空动力学报,2008,23(8):1455-1460.

LI Diansen, LU Zixing, LIU Zhenguo, et al. Finite element analysis of thermal conductivity of three dimensional and five directional braided composites[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(8):1455-1460. (in Chinese)

[17] 张建可. 树脂基碳纤维复合材料的热物理性能之一——导热系数[J]. 中国空间科学技术,1987,7(3):55-60.

ZHANG Jianke. The one of thermal physical properties of carbon fibre/epoxy—resin composites—thermal conductivity[J]. Chinese Space Science and Technology,1987,7(3):55-60. (in Chinese)

[18] 马青松,刘海韬,潘余,等. C/SiC 复合材料在超燃冲压发动机中的应用研究进展[J]. 无机材料学报,2013,28(3):247-255.

MA Qingsong, LIU Haitao, PAN Yu, et al. Research progress on the application of C/SiC composites in scramjet[J]. Journal of Inorganic Materials,2013,28(3):247-255. (in Chinese)

[19] 陈洁,熊翔,肖鹏. 单向 C/C 复合材料导热系数的计算[J]. 炭素技术,2008,27(2):1-4.

CHEN Jie, XIONG Xiang, XIAO Peng. Calculation of thermal conductivity coefficient in unidirectional carbon/carbon composite[J]. Carbon Techniques,2008,27(2):1-4. (in Chinese)