

理论与实验研究

陶瓷防热瓦间缝隙气动加热规律研究

秦强, 马建军

(全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 在分析缝隙内部流动特征的基础上, 利用CFD技术对瓦间缝隙气动加热的参数影响规律进行了研究, 着重探讨了来流马赫数、攻角、缝隙宽度、倒角半径及瓦间台阶因素对缝隙内部热流分布的影响。研究表明, 缝隙内部热流呈U形分布, 缝隙内部热流随着马赫数的增大而减小, 随着攻角、缝隙宽度、倒角半径、瓦间台阶的增大而增大。

关键词: 陶瓷防热瓦阵列; 气动加热; 缝隙换热

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.009

中图分类号: TQ317.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0042-05

Aerodynamic Heating in Gaps among Ceramic Insulating Tiles Array

QIN Qiang, MA Jian-jun

(Aeronautics Science and Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure and Fatigue, Xi'an 710065, China)

Abstract: Parametric analysis of aerodynamic heating in gaps among ceramic insulating tiles array was carried out by using CFD based on analyzing gap flow characteristic. Effects of Mach number, attack angle, gap width, tile edge radius, and steps among tiles on heating rate distribution in gaps were studied. Results showed that internal heat flux in gaps is U shape distribution, and decreases with increase of Mach number, but increases as increase of attack angle, gap width, tile edge radius, and steps.

Key words: ceramic insulating tiles array; aerodynamic heating; gap heating

可重复使用的高超声速飞行器是21世纪航空航天事业发展的主要方向, 机身、机翼大面积迎风区/背风区的热防护系统是高超声速飞行器的关键部件^[1-2]。

1 研究现状

陶瓷防热瓦是高超声速飞行器的一种典型可重

复使用的热防护系统。由于陶瓷防热瓦是以阵列的形式敷设于机体表面的, 因此瓦与瓦之间的缝隙是不可避免的, 如图1所示。该缝隙一方面给单块陶瓷防热瓦热膨胀变形预留了空间, 另一方面也可以协调陶瓷防热瓦间的受载变形。同时也带来了缝隙热短路问题, 因为如果缝隙设计不当, 大量的气动热将沿缝隙直接到达机体结构表面, 从而有可能使陶

收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 航空科学基金项目(20100923001)

作者简介: 秦强(1983—), 男, 河南林州人, 硕士, 工程师, 主要从事高速、高超声速飞行器热结构与热防护结构研究。

瓷防热瓦的热防护失效,造成严重的飞行事故。例如美国航天飞机在飞行试验期间,不断出现缝隙过热问题,有些缝隙处的侧壁温度曾达到临界状态。这是因为防热瓦表面约98%的热量可以辐射到空间去,而防热瓦间的缝隙底部能辐射到空间的热量仅为缝隙顶部的2.5%^[3],即缝隙狭窄特征使其内部辐射散热效应被阻塞,热流即便很小也有可能产生较高的侧壁温度,所以防热瓦间缝隙侧壁的气动加热状况极为严重。

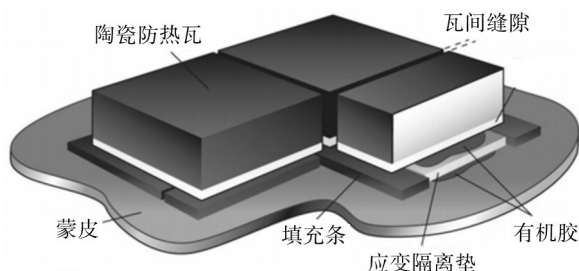


图1 陶瓷防热瓦阵列间的缝隙

Fig. 1 Gaps among ceramic insulating tiles array

国外早在20世纪七、八十年代研制航天飞机的初期,就对陶瓷防热瓦间的缝隙气动加热问题进行了较多的研究。研究手段以电弧风洞试验为主,主要研究了缝隙宽度、侧壁过渡圆角半径、缝隙方向、缝隙交接、瓦间台阶、边界层状态(层流或湍流)、边界层厚度和表面压力梯度等参数对缝隙两侧壁热流分布的影响,并总结了相应的工程经验公式以指导缝隙的合理设计^[4-9]。我国学者童秉纲在理论上定性分析了影响防热瓦间缝隙气动加热的因素,如根据航天飞机防热瓦缝隙流动的特点,从二维定常不可压缩层流的 $N-S$ 方程出发,提出了一个简化流动模型,即缝隙的二维流动可近似当作2个准一维沟槽流动的线性叠加,由此给出了缝隙中的热流率与压力、压力梯度和缝隙宽度等参数的关系^[10]。唐贵明在脉冲风洞中测试了宽度为2 mm、深度为25 mm的狭窄缝隙在不同气流条件下的缝隙侧壁热流分布状况,着重研究了马赫数、攻角及偏转角对缝隙内部热流分布的影响^[11]。唐功跃对不同外界流动条件下缝隙内的流动及其形成机理进行了探讨,确定了狭窄缝隙内的流动结构和缝隙内气体传热过程^[12]。总体而言,国内外对狭窄缝隙气动加热问题的研究都主要集中于试验测试,然而试验测试通常成本较高,

不利于陶瓷防热瓦间缝隙的初步设计。文中拟尝试通过建立相应的缝隙气动加热数学模型,利用计算流体动力学技术(CFD)来研究陶瓷防热瓦间的缝隙气动加热问题,着重探讨来流马赫数、来流攻角、缝隙宽度、防热瓦倒角半径、缝隙台阶对缝隙内部热流分布的影响。

2 缝隙内部流动特征

就陶瓷防热瓦间缝隙内部流动特征而言,相关学者已经给出了较为详细的描述^[12]。当来流攻角 $\alpha=0$,偏转角 $\beta=0$ 时,气流流过缝隙要发生分离,并向缝隙内膨胀。由于缝隙沿流动方向长度很小,所以这部分气流还没有完全膨胀到缝隙内较远的地方就碰到下游侧壁而形成逆向流。这股逆向气流再回到上游侧壁时受主流的黏性剪切作用又向下游流动,再次碰到下游壁面时又回流,这样在缝隙入口处形成了一个封闭的漩涡。由于漩涡位于缝隙入口处,受主流黏性剪切作用影响较大,因而其强度较大。同时这股漩涡要剪切其下层气体,在下层又形成一个与自身游向相反的漩涡。这样漩涡一层一层向下传递,在缝隙中就形成了垂直排列的漩涡系列。由于漩涡自身能量的耗散及各层漩涡之间的剪切耗散,所以在缝隙中的漩涡从上到下一层比一层弱,等到缝隙内一定深度的地方,漩涡通过黏性剪切作用传递给下层气体的能量不足以使下层气体形成漩涡。由此缝隙内定性上可以分为2个区域:以漩涡为主要特征的上层区域和以近乎静止为主要特征的下层区域,如图2所示。从换热的角度讲,上层区域主要是对流换热,而下层区域主要是导热。

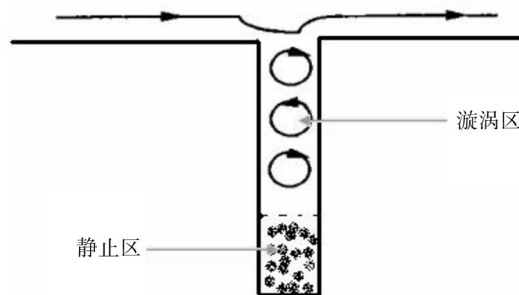


图2 缝隙流动结构

Fig. 2 Gap flow characteristic

当来流攻角 $\alpha>0$,偏转角 $\beta=0$ 时,在缝隙所在

的表面上会产生激波,激波的类型和激波角的大小由来流马赫数和攻角共同决定。在马赫数一定的情况下,当 α 较小时,产生激波角较小的斜激波。随着 α 的增大,斜激波的波角逐渐增大。当 α 增大到一定程度时(这个数值由当地的马赫数决定),壁面上的斜激波演变为壁面附近的脱体波。气流经过波角较小的斜激波后,仍然转折成与壁面平行的气流,只是流动参数有一些变化。气流经过波角较大的斜激波或脱体波后,则不能转折成与壁面平行的气流,而存在与壁面垂直的分量,使得缝隙流动相当复杂。文中仅研究了来流攻角较小的情况,所以产生的斜激波波角均较小。气流经过斜激波后仍然转折成与缝隙所在表面平行的气流,所诱导的缝隙流动结构与零攻角情况下相似。

当来流攻角 $\alpha=0$,偏转角 $\beta>0$ 时,缝隙流动出现明显的三维效应,流动结构相当复杂。偏转角对缝隙内部流动特征的影响,可以等效为宽度变化对缝隙内部流动特征的影响。由于隔热瓦间缝隙宽度本身很小(2 mm左右),等效后的宽度仍然很小,所以流动仍属于深空腔流动类型,缝隙内的流动结构也还是可以用垂直的漩涡系列来描述。由于考虑偏转角影响的隔热瓦间缝隙气动加热数值计算较为困难,因此文中假设偏转角为0。

3 计算模型与数值计算方法

由前文分析可知,由于陶瓷隔热瓦间的缝隙顶部并不存在密封(如图1所示),高速、高温气流可以直接窜入缝隙内部,因此该缝隙内部的换热机制主要以对流换热为主。对于陶瓷隔热瓦而言,缝隙的存在将会影响整体流动状态及其传/隔热特性。首先是缝隙入口处产生边界层分离与再附,导致局部热流升高;其次缝隙干扰增加了湍流度,加速了边界层转捩;最后由于缝隙狭小,辐射散热效应被阻塞,缝隙内即使热流很低的情况下,也可能产生较高的壁温,从而影响整体隔热效果。由此,了解陶瓷隔热瓦间缝隙热环境是十分必要的。该缝隙内流动属于具有分离漩涡的复杂流动,严格地讲,如果要精确计算陶瓷隔热瓦间缝隙内部的热分布状况就必须联立求解三维可压缩流动的N-S方程、连续性方程和能量方程,还要耦合求解气流穿过孔隙的渗流方程,在

计算热流时则要耦合求解隔热瓦中的热传导方程。另外,还应该随时考虑隔热瓦由于受载而不断发生的变形和位移以及由于受热不均匀而导致缝隙几何形状的变化,因此要精确地求解隔热瓦间缝隙内部热环境状况十分困难。

基于以上分析,该研究进行了简化处理。2块并列的陶瓷隔热瓦阵列如图3所示,主要由陶瓷隔热瓦、应变隔离垫及飞行器蒙皮组成。一般隔热瓦的上表面边界设置有倒角,主要是为了提高缝隙内部的辐射散热,从而减弱缝隙内部温度而设置的。出现高度 h 的台阶是因为不同位置的局部隔热要求不一样或者受载变形引起的。

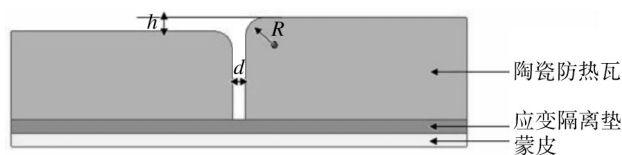


图3 2块并列的陶瓷隔热瓦

Fig. 3 Two parallel ceramic insulating tiles array

根据研究目的,建立的实际物理模型如图4所示。另外需要说明的是该研究假设高速气流的方向与缝隙延伸方向垂直,即考虑的是缝隙气动加热最为严酷的情况,而且认为在偏转角为0的情况下窄缝隙内流动为二维流场,即忽略缝隙延伸方向流场变量的变化。

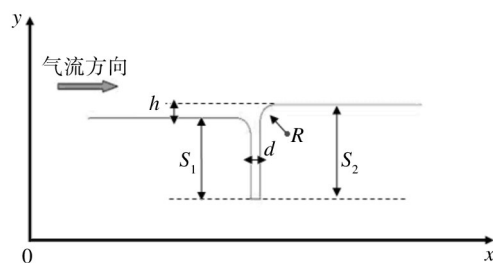


图4 物理模型

Fig. 4 Physical model

根据建立的物理模型及研究目的,建立以下流动控制方程组,主要包含二维定常流动连续性方程、N-S方程及能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} (k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\tau_{ij})_{\text{eff}} u_j) \quad (3)$$

其中: $\tau_{ij} = \mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$; k_{eff} 指有效热传导系数; $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 指有效剪切力。

以上各式中使用了爱因斯坦求和标记。缝隙内部流动状态为湍流,采用时间平均法来研究紊流流动,对 $N-S$ 方程进行雷诺平均处理,并应用粘性假设封闭方程组,建立湍流模型。研究中使用 $k-\varepsilon$ 模型,它将涡系数和湍动能、湍动能耗散率联系在一起。由于所采用的 $k-\varepsilon$ 模型和模型常数只适用于距离壁面一定距离的湍流区域,在近壁区湍流雷诺数很低,因此必须考虑分子粘性的影响。在实际的计算中采用壁面函数法来解决这一问题,利用 $k-\varepsilon$ 方程求解完全湍流区域,使用设置在粘性底层边缘外第1层网格单元的湍动能和耗散率作为边界条件,进行如下处理:

$$y^+ \leq 11.23: U^+ = y^+, k = k_s = \frac{y}{y_v}, \varepsilon = \varepsilon_v = \frac{y}{y_v} \quad (4)$$

$$y^+ > 11.23: U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+), k = \frac{\tau_w}{\rho C_\mu^{1/2}}, \varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y} \quad (5)$$

其中:冯卡门常数 $\kappa = 0.42$; 壁面函数常数 $E = 9.81$ 。

边界条件设置:壁面处流体速度,由于是粘性流动,满足黏附条件即无滑移速度条件,即 $U=V=0$; 壁面为绝热状态,即 $dT/dn=0$; 由于是定常流动问题,因此在壁面处压力梯度为0,即 $dP/dn=0$; 对于入口设为压力远场边界条件; 由于是超音速流动,因此出口的参数由内场外插值得到。

利用有限体积法对上述建立的数学模型进行离散化处理与求解,计算过程中应用了SIMPLE算法。划分网格情况如图5所示。

4 计算结果

首先给出了缝隙宽度 $d=2$ mm、来流攻角 $\alpha = 30^\circ$ 、来流马赫数 $Ma=3$ 时,且不考虑缝隙倒角半径条件下缝隙内部的局部流动云图,如图6所示。可以明显看出,无论是否有缝隙台阶,缝隙顶部均有明显

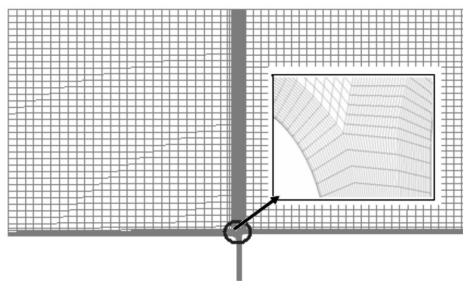


图5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

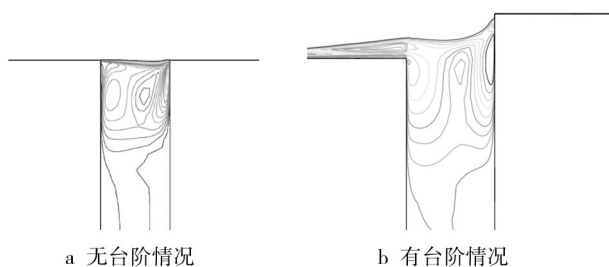


图6 缝隙内部流动状况计算结果

Fig. 6 Calculation result of gap internal flow

的流动分离及漩涡现象,基本捕捉了高速气流掠过狭窄缝隙的流动特征,从而一定程度上反映了各计算条件下的缝隙气动加热CFD计算精度。由于其他计算条件下缝隙内部流动状况计算结果基本相似,仅是数值的相对变化,因此其云图不再一一给出。

为了探讨来流马赫数对缝隙气动加热的影响,进行了如下设置:缝隙宽度 $d=2$ mm、来流攻角 $\alpha = 30^\circ$ 。同时,处于计算效率考虑,此计算条件下不考虑缝隙倒角、缝隙台阶,分别计算了 Ma 为3,4,5下缝隙内部热流分布状况,如图7所示。横坐标涉及的 $L=S_1+S_2+d$ (由于不考虑缝隙台阶,因此 $S_1=S_2$), S 表

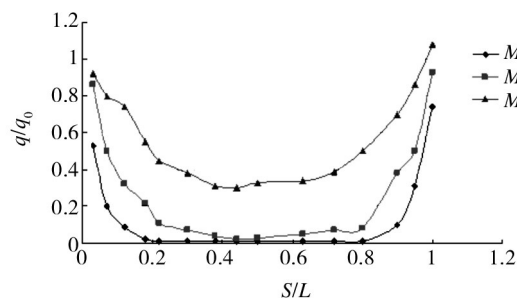


图7 不同马赫数下缝隙内部热流分布状况

Fig. 7 Internal heat flux distribution among gaps at different Mahler number

示自缝隙背风面入口唇缘算起的缝隙壁面距离, q_0 是无缝隙时当地局部热流。

为了探讨来流攻角对缝隙气动加热的影响,进行了如下设置:缝隙宽度 $d=2\text{ mm}$ 、来流马赫数 $Ma=3$ 。同时,处于计算效率考虑,此计算条件下不考虑缝隙倒角、缝隙台阶,分别计算了来流攻角 α 为 0° , 10° , 30° 下缝隙内部热流分布状况,如图8所示。

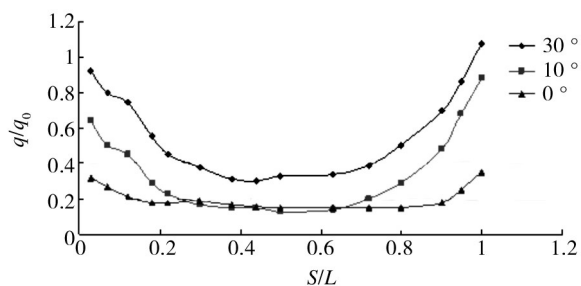


图8 不同来流攻角下缝隙内部热流分布状况

Fig. 8 Internal heat flux distribution among gaps at different attack angle

为了探讨倒角半径对缝隙气动加热的影响,进行了如下设置:缝隙宽度 $d=2\text{ mm}$ 、来流马赫数 $Ma=3$ 、来流攻角 $\alpha=30^\circ$ 。同时,处于计算效率考虑,此计算条件下不考虑缝隙台阶,即 $h=0$,分别计算了倒角半径 R 为 $1, 3, 5\text{ mm}$ 下缝隙内部热流分布状况,如图9所示。其中横坐标涉及的 Z 是沿缝隙深度方向的坐标, $S_1=S_2$ 是缝隙的总深度, q_0 是无缝隙时当地局部热流。考虑到缝隙内部迎风面与背风面热流分布的对称性,仅给出了缝隙迎风面的热流。

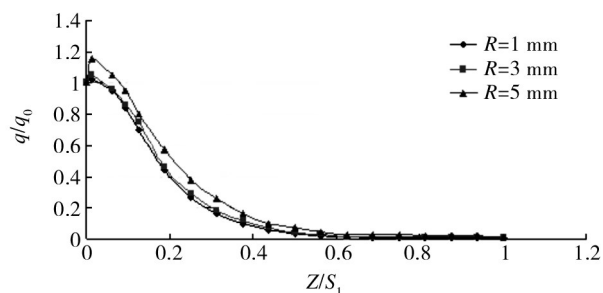


图9 不同倒角半径下缝隙迎风面热流分布状况

Fig. 9 Windward side heat flux distribution among gaps at different tile edge radius

为了探讨缝隙宽度对缝隙气动加热的影响,进行了如下设置:来流马赫数 $Ma=3$ 、倒角半径 $R=3\text{ mm}$ 、来流攻角 $\alpha=30^\circ$ 。同时,处于计算效率考虑,

此计算条件下不考虑缝隙台阶即 $h=0$,分别计算了缝隙宽度 d 为 $1, 2, 3\text{ mm}$ 下缝隙处热流分布状况,如图10所示。由于热流最大值状况通常是主要关心量,因此该计算条件下仅给出了缝隙顶部迎风面最大热流相对值及所处大概位置。

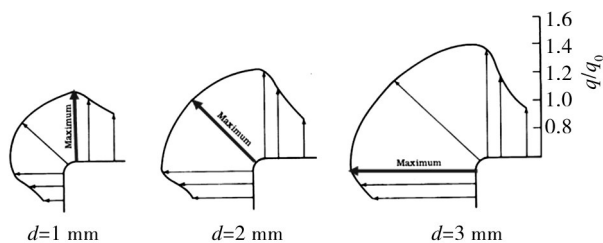


图10 不同缝隙宽度下缝隙顶部热流局部分布状况

Fig. 10 Gaps top local heat flux distribution at different gap width

为了探讨缝隙台阶对缝隙气动加热的影响,进行了如下设置:来流马赫数 $Ma=3$ 、来流攻角 $\alpha=30^\circ$ 、缝隙宽度 $d=2\text{ mm}$ 。同时,处于计算效率考虑,此计算条件下不考虑缝隙倒角半径影响,分别计算了缝隙台阶 h 为 $1, 2, 3, 4\text{ mm}$ 下缝隙处热流分布状况,如图11所示。由于热流最大值状况通常是主要关心量,因此该计算条件下仅给出了缝隙顶部迎风面最大热流相对值随缝隙台阶高度的变化状况。

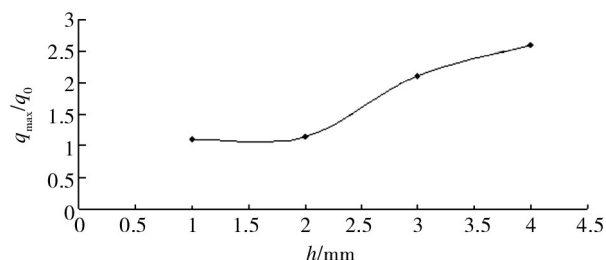


图11 不同缝隙台阶高度下缝隙顶部最大热流值

Fig. 11 Maximum gaps top heat flux at different gap steps

5 结语

由于缝隙内部流动涉及流动分离及漩涡问题,而且高速气流气动加热CFD计算精度与物理模型、网格数量、计算格式等许多因素密切相关,因此准确计算缝隙气动加热较为困难。该研究一方面通过理论分析了缝隙内部流动基本机理及结构,然后在参考气动

(下转第51页)

- 备管理与维修,2009(12):36—37.
- [6] 付占达,芮玉兰,周坤.含盐体系中有铜缓蚀剂及缓蚀机理研究进展[J].化工生产与技术,2007,14(1):38—42.
- [7] 方景礼,方欣.金属表面配合物保护膜述评—铜及铜合金的防变色配合物膜[J].材料保护,2007,40(11):76—80.
- [8] 何俊,于萍,罗运柏.铜缓蚀剂的研究现状与进展[J].材料保护,2006,39(4):42—47.
- [9] 吕雪飞,甘树坤.化学处理液中的La及BTA对铜合金表面性能的影响[J].表面技术,2012,41(5):70—72.
- [10] 邢红忠,李伟.改性咪唑啉缓蚀剂抗H₂S/CO₂腐蚀性能研究[J].全面腐蚀控制,2012,26(12):40—44.

(上接第46页)

加热CFD计算相关资料的基础上,建立了缝隙气动加热计算模型,选用了具有二阶精度的计算格式,所有计算网格均进行了网格无关性验证,固体壁面附近网格最小尺寸达到了0.001 mm,从而最大程度上保证了计算结果的可靠性。尽管如此,问题的复杂性决定了各计算结果的精度仍需进一步探讨与验证,但计算结果基本可以作为定性认识缝隙气动加热规律的依据。通过陶瓷防热瓦间缝隙气动加热数值计算可以得出以下结论。

1) 缝隙内部热流分布基本呈“U”形状态,缝隙迎风侧壁与背风侧壁热流基本对称,缝隙迎风侧壁热流略高于背风侧壁,这主要是由缝隙的狭窄性决定的。

2) 相比缝隙底部,缝隙顶部流动较为剧烈,流速相对较大,因此除缝隙底部流动“滞止”区以导热为主要传热机制外,缝隙中部及顶部流动分离及涡流区以对流换热为主要传热机制。同时,缝隙内部流动速度分布状况也决定了缝隙内部热流分布随缝隙深度增加而减小的规律。

3) 来流马赫数与缝隙内部热流分布呈负相关关系,而来流攻角、倒角半径、缝隙宽度、缝隙台阶与缝隙内部热流分布呈正相关关系。

4) 缝隙气动加热产生的最大热流位置在倒角处,而且随着缝隙宽度的增大,该最大热流位置沿着缝隙侧壁有向缝隙深处转移的趋势。

5) 缝隙内部大部分区域处于低热流区,而且该低热流区随着来流马赫数的增大而增大,随着来流攻角的增大而减小。

参考文献:

- [1] 秦强,蒋军亮.金属TPS蜂窝盖板的热诱导变形计算[J].装备环境工程,2011,8(3):34—37.
- [2] 任青梅,刘一鸣,成竹,等.热防护系统热真空模拟试验技术[J].装备环境工程,2009,6(6):64—68.
- [3] 张鲁明.航天飞机空气动力学分析[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [4] JOHNSON C B.Heat Transfer Data to Cavities Between Simulated RSI Tiles at Mach 8,CR-128770[R].NASA,1973.
- [5] FOSTER T F, LOCKMAN W K, GRIFALL W J. Thermal Protection System Gap Heating Rates of the Rockwell International Flat Plate Heat Transfer Model (OH2A/OH2B), CR-134077[R].NASA,1973.
- [6] THROCKMORTON D A. Heat Transfer to surface and Gaps of RSI Tile Arrays in Turbulent Flow at Mach 10.3, TM X-71945[R].NASA,1973.
- [7] CHRISTENSEN H E, KIPP H W. Data Correlation and Analysis of Arc Tunnel and Wind Tunnel Tests of RSI Joins and Gaps Volume I—Technical Report, CR-134345[R].NASA,1974.
- [8] DUNAVANT J C, THROCKMORTON D A. Aerodynamic Heat Transfer to RSI Tile Surfaces and Gap Intersections[J].Spacecraft&Rockets,1974,11(6):437—440.
- [9] THROCKMORTON D A. Pressure Gradient Effects on Heat Transfer to Reusable Surface Insulation Tile-Array Gaps, TND-7939[R].NASA,1975.
- [10] 童秉纲.航天飞机防热瓦缝隙气动加热的讨论[J].气动实验与测量控制,1990,4(4):1—7.
- [11] 唐贵明.狭窄缝隙内的热流分布实验研究[J].流体力学实验与测量,2000,14(4):1—6.
- [12] 唐功跃.缝隙流动分析及其热环境的工程计算[J].中国空间科技,1996,(6):1—7.