

# 内流热环境的热流模拟方法

涂建强 刘德英 陈连忠

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

**文 摘** 对内流热环境的热流测量方法进行了试验研究和模拟,对比分析了内流热环境与外流热环境的不同。采用超声速矩形湍流导管试验技术,利用等离子电弧加热器进行了内流与外流热环境的表面冷壁热流测量和材料考核试验。结果表明:在来流条件相同的情况下,与外流热环境下的测量值相比较,内流热环境下的冷壁热流值高出40%多,相同材料的背面温度高出400℃。通过直接测量的冷壁热流换算得到的热壁热流值却不到外流热环境下的热壁热流值的50%。因此,进行发动机防热设计时,必须进行材料考核试验,必须考虑材料的使用热环境,否则对材料的烧蚀性能的评估影响很大。

**关键词** 内流热环境,外流热环境,热流模拟方法,热流密度,电弧加热器

## Heat-Flux Simulation Method of Inner Flow Thermal Environment

Tu Jianqiang Liu Deying Chen Lianzhong

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

**Abstract** The heat-flux measurement method of the inner flow thermal environment was experimentally studied and simulated. And the difference between inner flow and the outer flow thermal environment was contrasted and analyzed. The supersonic rectangle turbulent duct technique and arc heater were used to measure the cold-wall heat-flux and test the material. The result indicates that in the same flow complexion, the cold-wall heat-flux of inner flow thermal environment is 40% higher than that of outer flow, and the back-temperature of the same material in inner flow is above 400℃ lower than that of other side of the material in outer flow. The hot-wall heat-flux of inner flow, transformed directly from the cold-wall heat-flux measurement, is 50% less than that of outer flow, and in the course of the scramjet heat-protection design, the material test experimentation must be carried through, and the thermal environment of the material must be considered. Or the influence on evaluating the ablation capability of the material may be unfavorable.

**Key words** Inner flow thermal environment, Outer flow thermal environment, Heat-flux simulation method, Heat flux, Arc heater

### 1 前言

防、隔热材料的使用对于提高发动机性能有着非常大的作用<sup>[1]</sup>。为避免高温、高压气流烧坏发动机壳体,保证壳体的气密性,需在壳体内表面设置一层防、隔热材料。该防、隔热材料应该具有小的烧蚀率和尽可能低的密度,且有较高的延伸率<sup>[2]</sup>。而热防护材料使用的热环境是发动机内部(内流)的高温热环境。为验证各种材料方案是否能够满足发动机的使用要求,对材料的耐烧蚀、抗冲刷、抗氧化、抗热冲击性能进行试验考核是非常必要的。

在防、隔热材料地面模拟试验中,材料的表面热

流密度是材料考核的关键参数之一。烧蚀材料的质量烧蚀率与气体热流密度的平方根成正比<sup>[3]</sup>。因此进行材料考核试验时,模拟材料表面的热流密度的大小和热流剖面是至关重要的。

内流热环境与外流热环境的区别很大。在内流中,内流的高温气流以热辐射和对流换热的形式向壳体内部防、隔热材料传热,材料要经受烧蚀和氧化以及高温高速气流的冲刷和热冲击<sup>[4]</sup>,而且材料周围都是壳体内部的高温壁面,所以内流中使用的防、隔热材料的使用工况是与高温壁面(表面温度与之相近)相互热辐射下的热环境(辐射换热量很小<sup>[5]</sup>);而

收稿日期:2008-09-17

作者简介:涂建强,1982年出生,硕士研究生,主要从事气动热试验技术研究。E-mail:tujianqiang@gmail.com

外流热环境则是高超声速气流绕过飞行器表面,由于气体粘性的阻滞作用而产生的气动热环境<sup>[6]</sup>,存在着向环境温度(300 K)下的大气或冷壁面的热辐射散热。由于防、隔热材料表面温度在此热环境下一般都在千度以上,甚至是几千度。存在向冷壁辐射放热(辐射换热量较大)对于减小材料的表面温度、降低材料表面的冷壁热流密度的效果比较大。

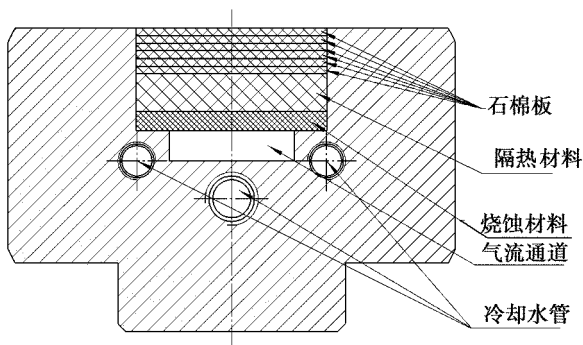
本文通过对内、外流两种热环境下热流密度的测量和材料的考核试验,对比分析了这两种热环境下的冷壁热流密度、热壁热流密度以及烧蚀材料的表面温度、背面温度,量化证明了材料考核时模拟是否存在这种辐射热流量的必要性。

## 2 设备和模型

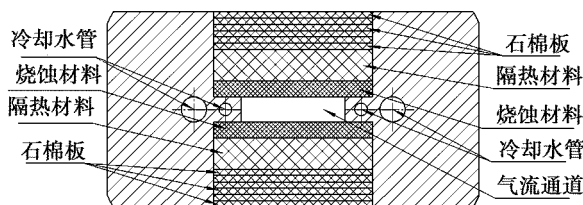
冷壁热流测量和材料考核试验是在电弧加热器矩形湍流导管中进行的。试验设备包括:电弧加热器、气体混合室、超声速喷管、超声速导管以及配套的高压水、气、电、测控系统。

试验用电弧加热器为管状电弧加热器,试验条件为:弧室压力 $p \leq 5.0$  MPa,气流总焓 $H \leq 20$  MJ/kg。超声速喷管为内外套水冷夹层结构,喷管内表面按气动型面进行加工,名义马赫数 $Ma = 2.3$ 。

超声速导管为整体打孔水冷结构。根据需要设计了两套超声速矩形湍流导管,其截面结构示意图见图1。



(a) 单模型导管



(b) 双模型导管

图1 超声速导管以及模型安装位置

Fig.1 Supersonic rectangle turbulent duct and installation positions of models

图1(a)是模拟外流热环境的单模型超声速导管,烧蚀材料正对着水冷紫铜壁面辐射放热,将水冷紫铜壁面近似为冷壁面;图1(b)图是模拟内流热环境的双模型超声速导管,烧蚀材料则是正对着另一块表面温度与之相近的高温烧蚀材料相互辐射。

所用模型为平板 C/C 烧蚀材料,表面涂有 SiC 涂层,外观尺寸为 90 mm × 50 mm,厚度 5 mm。模型背面安装有 10 mm 厚的氧化锆隔热材料,与材料在内流中的使用环境相同。

## 3 试验参数测试方法和热流测量结果

由于内流的材料考核试验要求模拟气流的总温 $T_0$ 和模型表面静压 $p$ 。所以模型试验前对喷管喉道前的气流总温 $T_0$ 、超声速湍流导管内的冷壁热流密度 $q_{ecw}$ 和导管内静压 $p$ 进行了测量<sup>[7]</sup>。

冷壁热流测量采用瞬态热容量式量热计测量。该种量热计是由高热导率的无氧铜圆柱量热塞块和量热热电偶组成,该量热计装在一水冷铜测试探头上,由于量热响应只与量热块的几何尺寸和物理特征有关,在保证一维传热的情况下,忽略热电偶传热和量热块背面对流换热,冷壁热流密度表达式可写作:

$$q_{ecw} = C_{p,Av}(m/A) \cdot (dT/dt) \quad (1)$$

式中, $m$ 为量热块质量, $A$ 为探芯受热面积, $C_{p,Av}$ 为探芯平均比热容, $dT/dt$ 为探芯背面温升梯度。

在流场校测中,所用的压力测试探头和冷壁热流密度测试探头的形状与模型相同,在探头中心附近相距 40 mm 的位置布置了两个测点。用压力传感器结合数据采集系统测量导管内气流静压。

测试探头安装方式为:将图1(a)中材料的安装位置换成水冷的测试探头,使探芯正对着打孔水冷紫铜壁面进行测试;将图1(b)中其中一块材料的安装位置换成水冷的测试探头,使探芯正对着一块正在进行高温考核的材料进行测试的,能够接收到高温壁面的热辐射。

来流材料考核试验流场参数如下:气流总温 $T_0 = 2500$  K,导管内气流静压 $p = 84.9$  kPa,此两项参数不受水冷或高温壁面的影响,保持了很好的重复性。通过测量探芯的温度变化率得到的两种热环境下的冷壁热流密度曲线见图2。从图2可以看出,内流和外流热环境下的冷壁热流密度分别为 2.43 和 1.69 MW/m<sup>2</sup>。由于存在高温壁面对探芯的辐射换热,使材料表面的冷壁热流增加了 0.74 MW/m<sup>2</sup>,增量约 43.5%,这必然会对材料的考核和评估产生严重的影响。

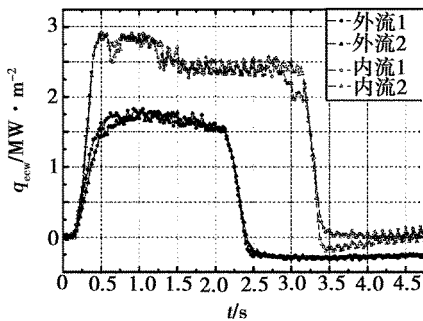


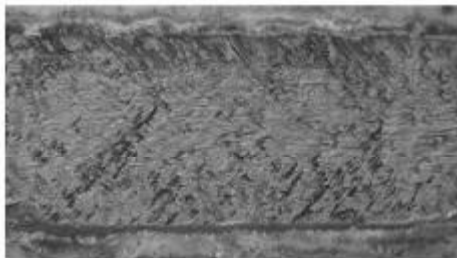
图2 两种热环境下的冷壁热流曲线  
Fig.2 Cold-wall heat-flux curves under two kinds of thermal environments

#### 4 材料考核试验结果

在相同的气流总温  $T_0$  以及导管内气流静压  $p$  的试验状态下,进行了超声速矩形湍流导管的材料考核试验。在内流和外流热环境下的试验时间分别为 150 和 300 s,烧蚀后的材料照片见图 3。



(a) 内流



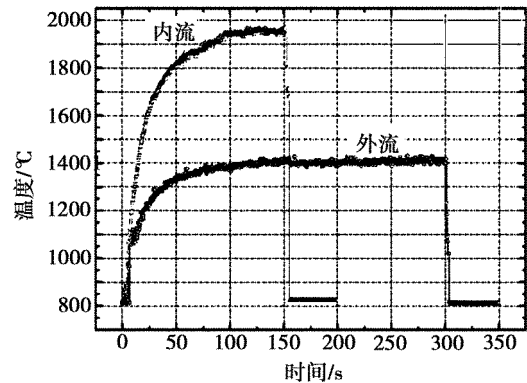
(b) 外流

图3 内流和外流热环境下烧蚀后材料照片  
Fig.3 Photos of model after ablation on inner flow and outer flow thermal environment

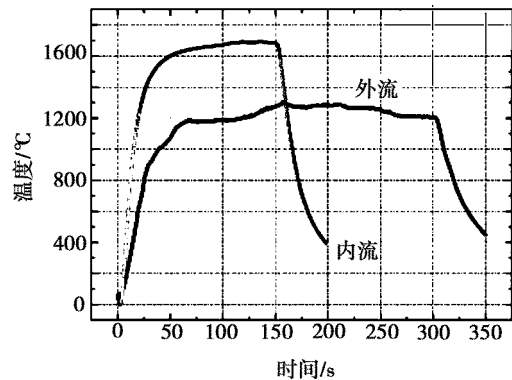
从图 3 可以看出,在内流热环境下,材料经过了 150 s 后,材料表面大部分涂层都已烧掉,表面有许多细小的针状烧蚀坑。在外流热环境下,材料经过 300 s 后,表面的烧蚀坑与内流热环境下 150 s 后的材料类似,只是烧蚀坑略为深些。

利用双色红外热像仪测量烧蚀材料表面温度,利用铂铑-铂铑热电偶测量烧蚀材料背面温度,测量的烧蚀材料表面和背面温度变化曲线分别见图 4。

从温度曲线可以看出,在内流和外流热环境下,材料的温度分别在 100 和 150 s 左右达到稳定状态,其表面温度分别为 1 962 和 1 415 $^{\circ}$ C,背面温度分别为 1 687 和 1 277 $^{\circ}$ C。两种热环境下材料的表面温度相差 547 $^{\circ}$ C,背面温度相差 410 $^{\circ}$ C,在内流热环境下的材料表面和背面温度都比在外流热环境下的高出 400 $^{\circ}$ C 以上。其主要原因是:在外流热环境下,材料表面会对低温的水冷紫铜壁面辐射放热,使材料的表面温度降低,如此,材料的背面温度也会相应降低;而在内流热环境下,材料表面周围都是与其温度相近的壁面,也就没有辐射放热这一项了,所以内流热环境下的材料温度均比外流的高出许多。



(a) 表面



(b) 背面

图4 两种热环境下的表面和背面温度曲线  
Fig.4 Surface and rear temperature curves of models under two kinds of thermal environments

#### 5 结果分析

##### 5.1 热壁热流密度对比

在试验中,模型表面的冷壁热流密度可以直接测量,而烧蚀时材料表面的热壁热流密度难以直接测量。通常是根 据材料的表面温度,将直接测量的材料表面的冷壁热流值换算成材料表面的热壁热流密度,换算关系式为:

$$q_{ehw} = \left(1 - \frac{H_{hw}}{H_0}\right) \cdot q_{ecw} \quad (2)$$

式中,  $q_{\text{chw}}$  为烧蚀时材料表面的热壁热流密度,  $H_{\text{hw}}$  为对应于烧蚀时材料的表面温度下的气流焓值,  $H_0$  为气流总比焓, 它们可以分别通过表面温度和气流总温查表得到<sup>[8]</sup>。

根据直接测量的材料表面温度、冷壁热流密度和气流总温可以得到在内流和外流热环境下材料表面的  $q_{\text{chw}}$  分别为 0.310 和 0.625 MW/m<sup>2</sup>。即由于材料表面存在向打孔水冷的紫铜壁的热辐射放热, 导致材料表面的温度更低, 材料从高温气流中吸收的热流更大, 所以外流热环境下材料表面的热壁热流密度更大。

从换算得到的热壁热流密度值可以看出: 外流热环境下材料表面的热壁热流密度相当于内流热环境下的 2 倍多, 这对于有效烧蚀焓<sup>[9]</sup> (定义: 在烧蚀温度下, 材料表面无烧蚀下的热流密度与材料的质量烧蚀率之比) 等评估材料烧蚀性能的参数影响极大。

## 5.2 辐射换热热流估算

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律和热辐射的基础知识得到被透明介质隔开、面积相同的两平行固体表面间的辐射换热公式为<sup>[10]</sup>:

$$q_E = \varepsilon_s \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中,  $q_E$  为辐射热流密度。  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ , 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。  $T_1$ 、 $T_2$  为材料的表面温度。  $\varepsilon_s$  为两平行材料的系统发射率, 它是考虑由于灰体系统多次吸收与反射对换热量影响的因子, 它的表达式为:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{(1/\varepsilon_1) + \varepsilon_2 - 1} \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为两平行材料的表面发射率。

在内流热环境下, 与材料正对着的壁面表面温度与其平行的材料表面相近 ( $T_1 \approx T_2$ ), 且材料相同, 说明  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ , 所以可以认为此热环境下材料表面的辐射换热量几乎为 0。

在外流热环境下, 与材料正对着的壁面为打孔水冷的紫铜壁, 假定其表面温度为 150℃, 测量的材料表面温度为 1415℃, C/C 材料的表面发射率取为 0.85, 表面沉积黑色杂质的水冷紫铜的表面发射率取为 0.6, 所以得到此热环境下材料表面对水冷紫铜壁面的辐射放热热流为 0.25 MW/m<sup>2</sup>。

虽然该辐射热流值受材料的系统发射率  $\varepsilon_s$  的一

定影响, 但是从量级上来看, 该值与两种热环境下的热壁热流之差相当, 证明了造成材料表面的热壁热流存在如此大的差异的主要原因在于是否存在高温材料与低温壁面之间热辐射换热。

## 6 结论

材料的考核试验中, 气流总温和材料表面的热流密度是材料烧蚀率的主要影响因素, 所以对内流热环境进行模拟时, 虽然模拟气流总温和材料表面的静压 (根据二者与冷壁热流密度的关系, 外流热环境下的冷壁热流密度也几乎确定) 是必要的, 但是在来流条件相同的情况下, 内流热环境下的冷壁热流值比外流热环境下的测量值高出 40% 多。所以在对材料进行考核时必须考虑材料使用的热环境。如果给在内流热环境中使用的材料表面提供了向外界冷壁的辐射散热, 那么烧蚀的结果将与真实使用热环境下的结果差距很大。

## 参考文献

- 1 陈炳贻. 航空发动机材料的发展. 航空科学技术, 1998; (2): 15 ~ 17
- 2 曹运红, 盛德林, 邢娅. 超燃冲压发动机用复合材料技术的研究状况. 飞航导弹, 2005; (6): 54 ~ 58
- 3 Nevin K H, Carrol F C. Feasibility of standard evaluation procedures for ablation materials. NASACR-379, 1996: 49 ~ 68
- 4 康芹. 发动机舱的热仿真与热分析. 西北工业大学硕士学位论文, 2007
- 5 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998
- 6 姜贵庆, 刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1 ~ 10
- 7 Winovich W., On the equilibrium sonic-flow method for evaluating electric-arc air-heater performance, NASA TN D - 2132, 1964
- 8 王丰. 液体和气体的热物理性质表. 北京: 科学出版社, 1982: 7 ~ 25
- 9 Adams M C, Powers W E, Georgiev S. An experimental and theoretical study of quartz ablation at the stagnation point. J. A. S. Journal, 1960: 535 ~ 543
- 10 Robert Siegel, John R. Howell. Thermal radiation heat transfer. Taylor & Francis, New York London, fourth edition, 2002: 213 ~ 217

(编辑 任涛)