



CSTAM 2009-0036
高温壁面热流与温度一体化测量传感器

李龙, 范学军, 仲峰泉, 王晶

中国科学院高超声速科技中心

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

第二届高超声速科技学术会议

2009年11月2-4日 安徽·黄山

高温壁面热流与温度一体化测量传感器

李龙^{1,2}, 范学军^{1,2}, 仲峰泉^{1,2}, 王晶^{1,2}

(1 中国科学院高超声速科技中心 北京海淀区 100190)

(2 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 为了研究超燃冲压发动机的热环境, 从 Gardon 热流测量理论出发, 研制了水冷热流传感器。同时, 根据固体热传导规律, 通过对热流和热流计基体温度的测量, 获得燃烧室的内壁温度。通过热流计头部热阻匹配, 对水冷系统进行了优化; 分别采用辐射、对流和热传导三种传热方式对传感器进行了热流-电压、壁温-热流的标定, 标定结果表现出较好的线性度和一致性。最后, 利用该热流/壁温传感器, 在模拟马赫数 6、总温 2500K 以上的来流条件下, 开展了超声速燃烧室壁面热流的初步测量, 测量结果与传热分析结果一致。

关键词 超声速燃烧室, 壁面热流, 壁温

引言

超燃冲压发动机燃烧室的热环境参数测量是研究超声速燃烧效率与主动冷却系统的一个关键。为了评估燃烧效率、优化燃烧室的主动冷却系统, 需要对相关参数进行测量。其中, 最重要的参数包括: 燃烧室出口气流总温、内壁面热流分布和内壁面温度分布。比如, 对应马赫数 6 的高超声速飞行, 燃烧室的气流马赫数约为 2.5, 燃烧后的气流总温可高达 3000 K, 壁面热流密度超过 1 MW/cm^2 ^{[1][2]}。常规的测量元件在超燃燃烧室中难以生存或者测量精度较低、量程不够。例如, B 型高温热电偶, 其最大工作温度也只有 2000 K; 另外, 采用光学元件等非接触性测量方法时, 要求在燃烧室安装石英玻璃等透光材料, 这对于石英玻璃的耐温和强度要求很高, 而且光学测量内壁面温度和壁面热流也有较大的误差; 此外, 常规的热流传感器由于响应时间较长(通常在 5-10 秒以上)、量程不够大, 难以获得较准确和稳定的测量结果。本文针对以上问题, 开发研制了可用于测量超声速燃烧室内壁面热流、温度的快响应传感器。本文研制的热流/壁温传感器可以在马赫数 2-3, 总温约 $\leq 3000\text{K}$, 总压 1-2MPa 的超声速燃烧气流中稳定工作。由于壁面热流同时与燃烧室内壁面温度和传感器基体温度有关, 所以即使对于相同的燃烧室壁温, 由于冷却条件不同, 使得传感器的基体温度不同, 从而得到的热流值也不同。本传感器可以同时测量燃烧室壁温和壁面热流, 可以确定出某个特定壁温和冷却条件下对应的壁面热流。传感器测量出来的为壁面上经过冷却后的热流, 再根据热流与温差的线性关系, 来反推出壁面温度较高时的热流, 这就为燃烧室的内壁面材料选择和冷却结构设计提供了帮助。传感器的探头直径小于 6 mm, 响应时间 3-5 秒, 可测量的最大热流为 2-3 MW/m²; 同时, 热流/电压、壁温/热流的标定结果显示了很好的线性度和可重复性。利用该传感器, 我们获得了马赫数 2.5 的超声速燃烧室(煤油燃烧当量比 0.68)的热流分布的初步数据, 测量结果与以往的传热分析结果吻合的较好。

度不同, 从而得到的热流值也不同。本传感器可以同时测量燃烧室壁温和壁面热流, 可以确定出某个特定壁温和冷却条件下对应的壁面热流。传感器测量出来的为壁面上经过冷却后的热流, 再根据热流与温差的线性关系, 来反推出壁面温度较高时的热流, 这就为燃烧室的内壁面材料选择和冷却结构设计提供了帮助。传感器的探头直径小于 6 mm, 响应时间 3-5 秒, 可测量的最大热流为 2-3 MW/m²; 同时, 热流/电压、壁温/热流的标定结果显示了很好的线性度和可重复性。利用该传感器, 我们获得了马赫数 2.5 的超声速燃烧室(煤油燃烧当量比 0.68)的热流分布的初步数据, 测量结果与以往的传热分析结果吻合的较好。

1 Gardon 热流计基本原理

1.1 二级标题

热流传感器的核心是 Gardon 热流计[3]。如图 1 所示, 将一个厚度为 0.1mm 的康铜圆片在边缘处焊接到铜热沉上, 康铜片中心再焊接一根铜导线, 就构成了最基本的 Gardon 热流计。均匀热流垂直进入康铜片, 热流在康铜片内由中心向边缘流动, 中心和边缘处产生一个温度差。该温度差与热流的关系为

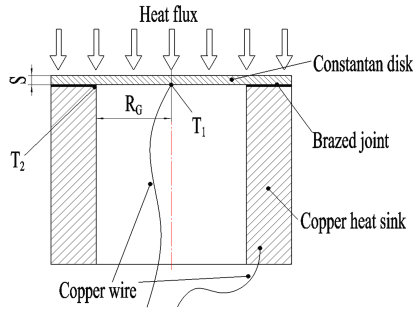


图1 Gardon 热流计

$$q = 16kS \frac{\Delta T}{d^2} \quad (1)$$

上式中， k 为康铜片的导热系数， S 为厚度， d 为康铜片的直径。

根据热电偶的构成原理，在康铜片的中心和边缘处分别形成了铜-康铜温差热电偶（即 T 型热电偶）。通过测量中心铜导线和铜热沉之间的电势差，可以得到康铜片中心和边缘的温度差，从而推导出康铜片表面的热流值。Gardon 在他的文献[3]里推导出的热流计的电压-热流关系如下：

$$\frac{E}{q} = 4.37 \times 10^{-7} \cdot \frac{R_G^2}{S} \quad (2)$$

其中， E 为电压， q 为热流， R_G 为康铜片的半径， S 为厚度，均采用国际单位制。从公式（2）可以看出对于给定的热流计，电压/热流呈现线性关系；同时，电压信号的强度与康铜片半径的平方成正比，与其厚度呈反比。

Gardon 热流计的响应时间与结构和材料的性质有关，例如，当温度为 350K 时，它的特征时间表达式为：

$$\tau_0 = 3.7R_G^2 \quad (3)$$

当温度不同时，材料的物性会发生变化，使得（2）式中的系数不同由于温度低于 800 K 时，铜和康铜材料的物性参数改变很小，热流计的响应时间只与康铜片的直径的平方成正比。

综上所述，Gardon 热流计的信号强度和响应时间均与康铜片半径的平方成正比，所以热流计的尺寸优化设计原则为：在保证信号强度的前提下，应该尽量减小康铜片的直径来提高响应速率。

2 热流、壁温测量传感器的设计

本文设计研制了可同时测量燃烧室内壁面热流、壁温的带水冷系统的快响应传感器。传感器的内部结构和实体分别为图 2、图 3。

2.1 结构说明

如图 2 所示，传感器的最外层为不锈钢外壳，头部采用了氮化硼陶瓷层，起到了绝缘和隔热作用；康铜薄片安装在陶瓷层的下面，并与基体紧密连接；基体材料为铜，内部有优化的冷却水通道；基体内安装 K 型热电偶，以实时监测铜基体的温度。

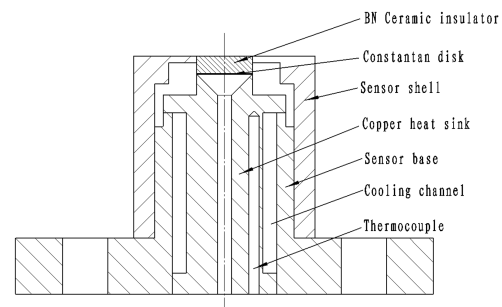


图2 传感器示意图

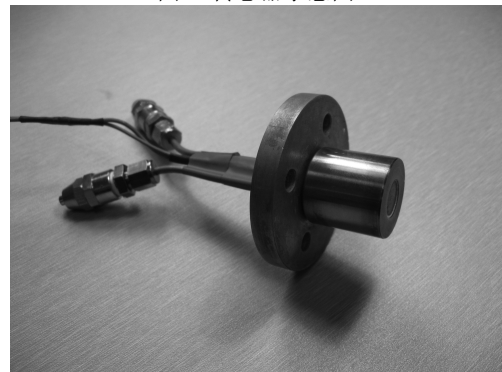


图3 传感器实际零件

2.2 探头头部热阻分析

传感器前端的隔热陶瓷和康铜片的尺寸对于热流信号强度和响应时间有很大影响。优化设计首先对头部热流流动进行了分析，确定各部分的热阻。如图 5 所示，热流垂直到传感器前端，沿两个方向传递。一部分沿轴向经过隔热陶瓷、康铜片进入铜基体；另一部分沿径向经过外壳进入铜基体。两条路径的热阻不同，因此沿两条路径流动的热流比例不同。在设计的热流探头时，如果沿径向的热阻远小于沿轴向的热阻，传感器头部接受的热流大部分将沿径向流动，而沿轴向流动的分量很小，这

会导致测量信号很弱。我们传感器的初期设计结果验证了这一点。

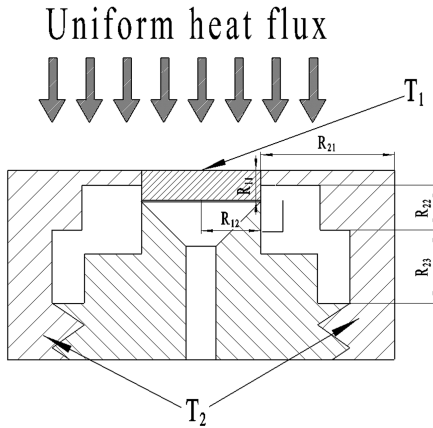


图4 传感器头部热阻示意

通过确定传感器外壳的材料、尺寸，隔热陶瓷的材料、半径、厚度以及康铜片的半径，可以定量地给出传感器头部的热阻。如图5所示，轴向热阻为 R_1 ，径向热阻为 R_2 ， R_1 和 R_2 的计算公式分别为：

$$R_1 = R_{11} + R_{12} \quad (4)$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} \quad (5)$$

(4)、(5)两式中： R_{11} 为隔热陶瓷的热阻， R_{12} 为康铜片的热阻， R_{21} 为外壳的头部圆环热阻， R_{22} 与 R_{23} 均为外壳的部分热阻。

为了使两部分的热阻接近，考虑到结构尺寸和材料选择，确定各个部件的材料和结构尺寸为：康铜片半径为 6 mm，导热系数为 22 W/M·K；隔热陶瓷采用氮化硼陶瓷^[4]，导热系数为 30 W/M·K，半径为 6 mm，厚度为 2 mm；外壳采用不锈钢，导热系数为 20 W/M·K，前端面厚度为 1 mm。将上述数值带入，得出各部分热组为：

$$R_{11} = \frac{l_{11}}{k_{11}A_{11}} = 2.3\text{Km}^2/\text{W} \quad (6)$$

$$R_{12} = \frac{d_{12}^2}{16k_{12}S_{12}} = 7.1 \times 10^{-4}\text{Km}^2/\text{W} \quad (7)$$

$$R_{21} = \frac{d_{212}^2 - d_{211}^2}{16k_{21}S_{21}} = 3.71 \times 10^{-3}\text{Km}^2/\text{W} \quad (8)$$

$$R_{22} = \frac{l_{22}}{k_{22}A_{22}} = 0.76\text{Km}^2/\text{W} \quad (9)$$

$$R_{23} = \frac{l_{23}}{k_{23}A_{23}} = 1.41\text{Km}^2/\text{W} \quad (10)$$

则有 $R_1=2.3\text{Km}^2/\text{W}$ ， $R_2=2.17\text{Km}^2/\text{W}$ ，因此有 $R_1 \approx R_2$ ，两部分的热阻基本匹配。

2.3 冷却结构设计

传感器内部的铜基体内部开有冷却水槽，如图6所示。

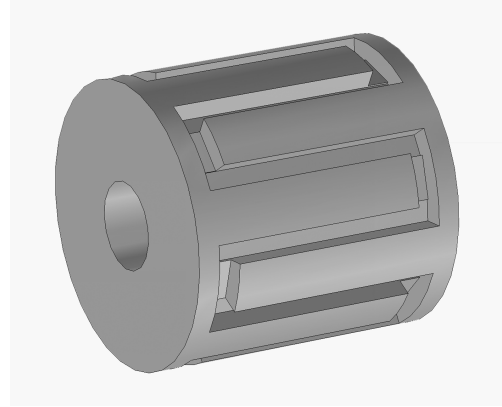


图6 冷却槽道示意图

冷却槽道为 2 mm×2 mm 的矩形槽道。采用一维对流换热理论分析，矩形槽道的等效水力直径为：

$$d_H = \frac{4A}{X} = 2\text{mm} \quad (11)$$

冷却水流量设定为 10g/s，则可计算出管道中雷诺数为：

$$\text{Re} = \frac{Ud_H}{\nu} = 6370 \quad (12)$$

通常，正方形槽道的临界雷诺数为 $\text{Re}_c=2000$ ， $\text{Re} > \text{Re}_c$ ，所以槽道内为湍流，换热效率较高。

假设燃烧室内壁面最大热流密度为 $2 \times 10^6 \text{W/m}^2$ ，根据能量守恒，当系统达到稳态时，进入传感器的热量等于冷却水带走的热量。表达式为：

$$\Delta T = \frac{q_w A}{m C_p} = 25.3\text{K} \quad (13)$$

如果冷却水入口水温为室温 300K，则冷却水出口水温最高为 325K，属于正常工作范围内。

综上，传感器的冷却系统设计能够满足超声速燃烧室内壁面测量时正常工作的要求，进一步的优化可以考虑减小冷却通道的尺寸，同时增加通道数，这样将提高对流换热系数，从而得到更高效的冷却效果。

3 热流和壁温的标定

本文设计了系统的传感器标定方法，分别针对热流和壁面温度进行了标定，得出了标定系数。

3.1 热流/电压标定

本文采用了基于热传导、对流换热和辐射传热三种形式的标定方法，以验证标定系数与传热方式无关。标定的过程是在相同的热流密度条件下，以标准的商用热流传感器测量的热流值为参考，通过记录独立开发的传感器的电压读数，两者比较，就是本传感器的标定系数。

导热传热的标定方法如图 7 所示，将两种传感器（商用和独立开发的）安装到同一台加热炉上，调节加热功率，分别测量不同功率下的热流信号，从而得到不同热流条件下的标定系数，标定结果如图 8 所示。可以看出，热流—电压曲线基本上为一条直线，即在不同的加热功率下，标定系数基本上相同。直线拟合得出导热形式下的标定系数为 $2.20 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{mV}$ 。

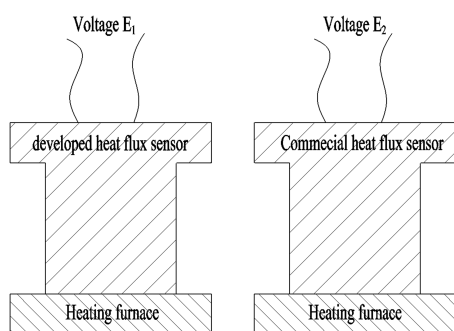


图 7 导热标定装置

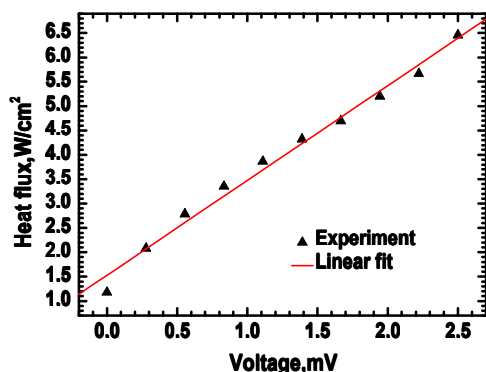


图 8 导热标定曲线

对流换热模式下为：分别使用酒精灯火焰垂直于两种传感器的测量平面进行加热，分别

测量两个传感器的信号，并且将两者相比，可以得出的标定系数为 $1.96 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{mV}$ 。

辐射传热的标定如图 9 所示。标定实验中使用的辐射台，由一排等间距排列的碘钨灯组成，每支灯的功率为 2KW。将两种传感器安装在辐射台上，调节辐射功率，测量不同功率下的辐射热流，从而得出一系列的标定结果，如图 11 所示。通过直线拟合，辐射传热给出的标定系数为 $2.15 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{mV}$ 。

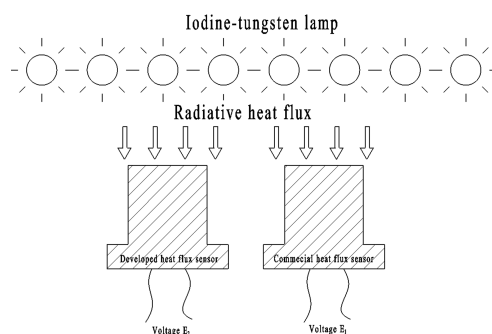


图 9 辐射标定装置

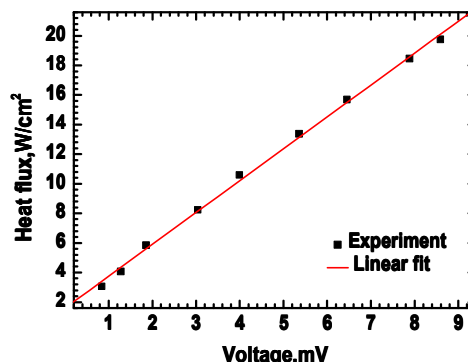


图 10 辐射标定曲线

以上三种不同的传热条件下得出的标定系数基本相同，说明了标定系数的一致性和重复性较好，验证了传感器在测量过程中不会受传热方式的影响。同时，由图 8 和图 11 可以看出传感器的热流/电压基本符合线性关系，这与 Gardon 热流计的基本原理是一致的。

3.2 温度测量标定

超声速燃烧室内气流的边界层一般小于毫米量级，并且内壁面温度可达 $1000-1400\text{K}$ ，因此普通热电偶无法准确地测量内壁温度。本文介绍的传感器通过测量基体的较低温度，并利用固体内热传导所遵循的热流/温差的线性关系来反推出内壁面的高温（即传感器头部温

度)。传感器头部与铜基体的温差 ($\Delta T = T_1 - T_2$, 参见图 4) 与头部接受的热流 q_w 有如下关系:

$$q = 16kS \frac{\Delta T}{d^2} = C(T_1 - T_2) \quad (14)$$

其中, C 是由材料和传感器尺寸决定的常数。可以对系数 C 进行标定, C 确定后通过同时测量铜基体的温度与热流来推导头部温度:

$$T_1 = T_2 + \frac{q}{C} \quad (15)$$

温差 ΔT 与热流 q_w 的标定过程如下: 在传感器内部安装一枚 K 型热电偶, 用来测量铜基体的温度 T_2 。将传感器安装在加热炉上, 用高温导热胶使传感器与加热炉紧密接触, 同时在传感器和加热炉外裹上石棉层, 保持热流均匀地向传感器流动。实时测量传感器头部的温度 T_1 和热流 q_w , 以及基体温度 T_2 , 通过公式(15)确定系数 C 。图 11 给出了温差 ΔT 与热流 q_w 的关系曲线。从图中可以看出温差和热流成良好的线性关系, 说明该传感器可以用来确定燃烧室内壁面的温度。

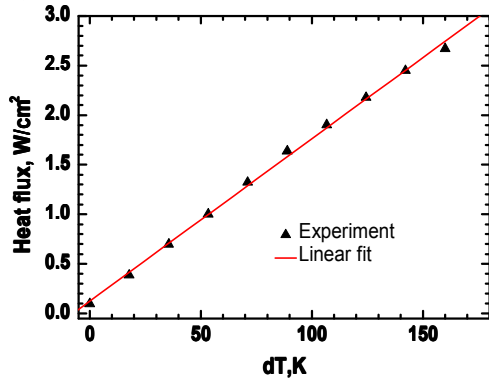


图 11 热流-温差标定曲线

4 超声速燃烧室热环境的初步测量

热流传感器已在马赫数 2.5 的超声速燃烧试验台上进行了初步测试。马赫数 2.5 的超燃试验台已成功地进行氢气, 液态煤油, 超临界态以及裂解态煤油超声速燃烧特性方面的系统性研究^{[6]~[8]}。该试验台通过空气加热器以烧氢补氧的方式获得高温来流, 可获得的加热空气马赫数 2—3, 流量 1—2 kg/s, 加热空气总温最高可达 2000 K。煤油通过多级加热系统加热至 600—1000 K, 以超临界态、热裂解态喷射到燃烧室内。燃烧室以及凹腔的具体尺寸可参见文献^[9]。

图 12 给出的是燃烧时加热空气总压和隔离段热流值 (安装在隔离段的热流传感器所测) 随时间的变化曲线。通过压力、温度测量, 来流的马赫数为 2.5, 流量 1.6kg/s, 总温为 1850 ± 50 K。如图 12 所示, 在 $t=3$ s 时由于氢气燃烧释热使得加热器内的空气压力迅速升高, 加热空气通过喷管开始建立高温的超声速气流。热流信号则上升得相对较慢, 在 $t=7$ s 基本稳定, 这是由于陶瓷隔热层带来的信号响应滞后。如何在充分保护康铜片的同时尽量减少陶瓷层带来的响应滞后是传感器今后改进的一个主要任务。

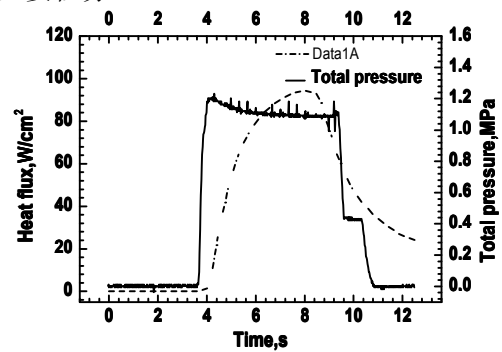


图 12 隔离段热流、总压响应曲线

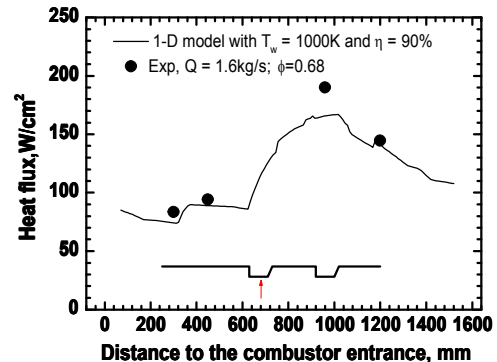


图 13 燃烧室壁面热流分布

对于有煤油燃烧的壁面热流分布的确定, 采用了 4 枚热流传感器, 沿流向安装在燃烧室的壁面。燃烧实验的条件为来流马赫数 2.5, 流量 1.6 kg/s, 来流总温 1800 K; 煤油燃烧当量比 0.68, 在第一个凹腔内喷射。图 13 给出了传感器测量的热流值。从图中可以看出: 在第一个凹腔下游, 由于燃烧释热使得壁面热流显著增大, 从上游的约 0.8 MW/m^2 上升到 2 MW/m^2 ; 同时, 由于燃烧室的扩张, 热流从第二个凹腔开始明显下降。图中的曲线为基于参考焓值法的一维传热分析^[10]给出的燃烧室壁面热流分布。参考焓值法由 Eckert 等人^[11]提出

并完善,适用于高速流动问题的壁面热流计算。文献[9]中详细介绍了参考焓值法和一维传热分析过程。从图中可以看出实验测量和传热分析结果吻合的较好。

以上结果表明,传感器在高温高速的气流中可以稳定工作,并且可以多次重复使用。传感器的响应时间较短,信号较强,所测数据与已有的传热分析吻合的较好。因此该传感器可以在超燃热环境参数的测量中充分发挥作用。

5 结论

本文针对超燃冲压发动机燃烧室热环境参数测量的要求,开发研制了壁面热流、温度测量传感器。传感器利用了 Gardon 热流计的原理,通过优化水冷结构和增加陶瓷隔热层等措施提高了传感器的生存能力。传感器具有信号强度高、响应速度较快和生存能力强的优点。针对热流信号,设计了三种不同方式的热流标定实验,得出了线性度较好、一致性较高的热流/电压标定系数。传感器的另一个特色就是可以通过测量热流和探针基体温度来间接地确定燃烧室内壁面温度。标定结果显示温差/热流同样具有很好的线性度。本文还利用该热流传感器,在超声速燃烧直联台上进行了测量实验,初步得出了热流分布数据,实验数据与传热分析给出的热流结果基本上吻合。今后的工作方向将进一步减小热流计的响应时间;并针对各种不同的燃烧情况,在燃烧室壁面的不同位置进行系统的热流和壁温测量,为理解和确定超声速燃烧室的热环境提供直接参考数据。

参考文献

- 1 H. Lander, A.C. Nixon Endothermic fuels for hypersonic vehicles [J]. *Journal of Aircraft*, 1971, 8(4)
- 2 沈剑, 王伟, 国外高超声速飞行器研制计划[J], 飞航导弹, 2006, 8.
- 3 Robert Gardon. An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 1953, Vol.24 (No.5): 366-370.
- 4 宗宫重行. 近代陶瓷[M]. 同济大学出版社. 1986
- 5 P.W. Dittus and L.M.K. Boelter, Univ. Calif. Publ. Engng., Vol.2, no. 13, pp.443-461
- 6 范学军, 俞刚. 超临界煤油超声速燃烧特性实验[J]. *推进技术*, 2006, 27(1)
- 7 X-J. Fan, G. Yu, J-G. Li, X-N. Lu, X-Y. Zhang, and C-J. Sung, "Combustion and Ignition of Thermal Cracked Kerosene in Supersonic Model Combustors", *Journal of Propulsion and Power* Vol.23 (2), pp. 317-324, 2007
- 8 X-J. Fan, G. Yu, J-G. Li, X-Y. Zhang, and C-J. Sung, "Investigation of Vaporized Kerosene Injection and Combustion in a Supersonic Model Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.22, No. 1, pp. 103-110, 2006
- 9 X-J. Fan, G. Yu, J-G. Li, X-N. Lu, X-Y. Zhang, and C-J. Sung, "Combustion and Ignition of Thermal Cracked Kerosene in Supersonic Model Combustors", *Journal of Propulsion and Power* Vol.23 (2), pp. 317-324, 2007
- 10 F-Q. Zhong, X-J. Fan, G. Yu, et al., "Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions", *AIAA Paper*, 2008-4615
- 11 Eckert, E. R. G., *Engineering Relations for Heat Transfer and Friction in High-Velocity Laminar and Turbulent Boundary Layer Flow Over Surfaces With Constant Pressure and Temperature*, *Transactions of the ASME*, Aug. 1956.

INTEGRATED HIGH TEMPERATURE SENSOR FOR WALL HEAT FLUX AND TEMPERATURE MEASUREMENT

LI Long¹ FAN Xuejun¹ ZHONG Fengquan¹ WANG Jing¹

(1 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract To study the thermal environment of the scramjet combustor, a water-cooled heat flux sensor has been developed based on the principle of Gardon heat flux measurement. According to the solid heat transfer law, the inner wall temperature of combustor can be obtained by the measurement of heat flux and base temperature of heat flux sensor. The water cooling system is optimized through heat flux sensor front end heat resistance matching. Three calibration processes (conduction, convection and radiation) with different heat transfer modes were attempted and the calibration results show good consistence of the data and good linearity. Finally, in order to simulate the flow conditions of mach 6 and total temperature 2500K, preliminary measurement results of the

sensor installed in a supersonic model combustor are discussed and the results show good consistency with heat transfer analysis.

Key words supersonic combustor; wall heat flux; wall temperature