

背面喷涂高辐射涂层的发动机防热材料 电弧加热试验模拟方法

涂建强¹ 陈连忠¹ 杨宪宁¹ 琚印超² 王 琴²

(1 中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

(2 北京动力机械研究所,高超声速冲压发动机技术重点实验室,北京 100074)

文 摘 采用等离子电弧加热器双模型矩形湍流导管试验技术模拟了发动机内流热环境,对背面喷涂了高辐射涂层的发动机防热材料进行了热防护性能考核。利用改进的试验件安装方法,在防热材料的背面提供了开敞式的常温环境,使防热材料的高温背面能够对周围常温环境辐射散热,模拟了防热材料背面的换热环境。采用 K 型热电偶和单色红外测温仪测量了防热材料背面高辐射涂层的温度。根据以上两种不同测温方式测量的温度曲线,得到了该背面喷涂的高辐射涂层材料的光谱发射率随温度的变化曲线。试验结果表明:背面喷涂了高辐射涂层的材料背面温度比材料背面没有涂层的低了 81.1 K;当温度在 1 103 ~ 1 153 K 时,该高辐射涂层材料的光谱发射率 $\varepsilon_\lambda(\lambda=1.6 \mu\text{m})$ 为 0.89 ~ 0.77,随温度升高, ε_λ 呈下降趋势。

关键词 电弧加热器,内流热环境,发动机防热材料,背面高辐射涂层,光谱发射率

Arc-Heating Test Simulation Method of Engine Thermal Protection Materials With High-Emissivity Rear Coating

Tu Jianqiang¹ Chen Lianzhong¹ Yang Xianning¹ Ju Yincao² Wang Qin²

(1 China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

(2 Beijing Power Machinery Institute, Science and Technology on Scramjet Laboratory, Beijing 100074)

Abstract The inner flow thermal environment of engine has been simulated by the arc-heater double-models rectangle turbulent duct technique in this paper. And the thermal protection performance of the thermal protection materials with high-emissivity rear coating has been tested. The improved model installation method, which can provide open-type environment with normal temperature in the material rear, can make sure that the rear coating of material can radiated energy to the atmosphere or wall with normal temperature. And the heat transfer environment of the material rear has been simulation by this method. The type-K thermocouples and single-wavelength infrared thermometer were used to measure the high-emissivity rear coating temperature. According to the rear temperatures measured by the two kinds of instruments, the spectral emissivity vs. temperature curve can be found. The results show that the rear temperature of thermal protection materials with high-emissivity rear coating is 81.1 K lower than that without high-emissivity rear coating. The spectral emissivity of high-emissivity rear coating $\varepsilon_\lambda(\lambda=1.6 \mu\text{m})$ is 0.89 to 0.77 for the temperature range from 1 103 to 1 153 K, and ε_λ decreases when the temperature increases.

Key words Arc heater, Inner flow thermal environment, Engine thermal protection materials, High-emissivity rear coating, Spectral emissivity

0 引言

热障涂层(thermal barrier coating, TBC)是一种广

收稿日期: 2013-06-09

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

泛应用于航空发动机燃烧室涡轮叶片、壁面以及其他热端部件热防护的涂层^[1]。其基本设计思想是利用陶瓷材料优越的耐高温、耐腐蚀、耐磨损和绝热等性能使其以涂层形式和基体复合,以提高结构件抵抗高温腐蚀的能力^[2]。在现有的技术条件下,厚度 250 μm 的 TBC 可以将发动机材料的内部温度降低 110 ~ 170 $^{\circ}\text{C}$,这一效果相当于高温合金在提高使用温度领域 30 年中取得的成绩^[3]。

近年来,随着高超声速燃烧技术的深入研究和应用,对热障涂层技术提出了更高的要求^[4]。在受热面有 TBC 的高温合金钢耐热材料背面喷涂几十微米的高辐射涂层,能够提高 TBC 耐热材料背面的光谱发射率,增加材料背面的辐射散热热流密度,这样能够降低发动机壁面材料的内部温度,提高 TBC 耐热材料在发动机应用环境的使用温度。

本文利用等离子电弧加热器双模型矩形湍流导管试验技术模拟了发动机的内流热环境^[5-6],改造了 TBC 耐热材料考核试件的安装工装结构,使 TBC 耐热材料的背面能够对周围的常温大气环境辐射散热,模拟了 TBC 耐热材料结构方案表面受内流加热、背面辐射散热的应用热环境。对背面喷涂了高辐射涂层的 TBC 耐热材料结构方案进行了考核,利用非接触的单色红外温度仪和接触式的 K 型热电偶测量了 TBC 耐热材料的背面高辐射涂层温度,获得了 TBC 耐热材料背面的该高辐射涂层材料的光谱发射率与温度的关系。

1 试验设备及试验件

1.1 试验设备

试验设备包括:等离子电弧加热器、稳压混合室、亚声速双模型矩形湍流导管以及配套的高压水、气、电、测控系统,如图 1 所示。试验所用等离子电弧加热器为管状电弧加热器,试验条件为:弧室压力 $p_0 \leq 5.0 \text{ MPa}$,气流总焓 $H_0 \leq 10 \text{ MJ/kg}$ 。

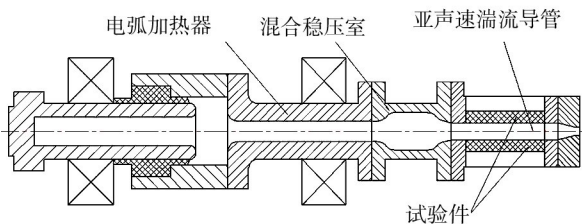


图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Test facility schematic drawing

试验过程中,经等离子电弧加热器加热的高温气

流首先进入混合稳压室。混合稳压室的内径为 $\Phi 200 \text{ mm}$,长度为 350 mm。在混合稳压室的入口采用径向注入的方式注入一定量的冷空气,使其与热气流充分混合,用以调节气流的总温并且消除气流脉动,混合后的气流再进入亚声速双模型矩形湍流导管,对 TBC 耐热材料结构方案进行热防护性能考核。

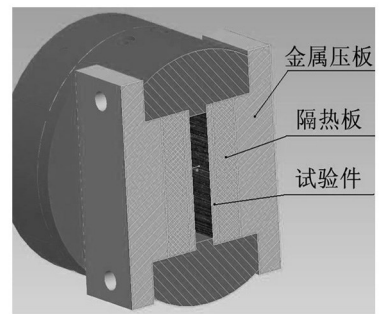
1.2 试验件

试验件尺寸为 100 mm \times 100 mm,厚度约 5 mm,受热面积为 90 mm \times 100 mm。主要材料为高温合金钢,位于中间层。受热面喷涂了 250 ~ 300 μm 的热障涂层,背面喷涂了 20 μm 的高辐射涂层。

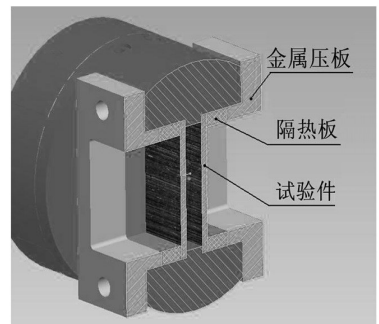
试验件背面表面采用储能点焊机焊接了一对 K 型热电偶,测量加热过程中的背面温度数据;此外,利用 MA2SC 单色红外测温仪测量试验件背面热电偶测点附近的温度数据。MA2SC 单色红外测温仪量程为 450 ~ 2 250 $^{\circ}\text{C}$,系统精度 $\pm 0.3\%$,光学分辨率 $\geq 300:1$,响应光谱波长 1.6 μm 。预先设定的背面高辐射涂层材料的表面光谱发射率为 0.875,由材料提供方估算提供。

1.3 试验件安装工装结构

与通常的飞行器外表面的耐热材料所不同的是,该 TBC 耐热材料背面喷涂了高辐射涂层,要求材料背面面对常温大气环境辐射散热(图 2)。



(a) 常用工装



(b) 改造后工装

图 2 试验件安装工装示意图

Fig. 2 Installation fixture structure of models

常用的试验件工装背面采用 20 mm 厚度的 100 mm×100 mm 的隔热板密封压紧安装。改造后的试验件安装工装中心有一个 80 mm×80 mm 的方孔,让 TBC 隔热材料的背面高辐射涂层能够对常温环境辐射散热。金属安装压板与试验件之间用隔热材料隔开,以减少试验件安装工装的吸热影响。

2 试验

2.1 试验参数

要求试验件表面为亚声速流动,以模拟发动机内部气流流动速率,试验 $Ma=0.6$,气流总温 1 630 K,试件表面压力 430 kPa,试验时间为 600 s。

2.2 试验流场参数校测方法

试验调试过程中主要测量气流总温、试验件表面冷壁热流密度和表面压力。冷壁热流密度的测量主要是为了获取对应于该流场参数的材料表面加热率情况。测量的来流总温为 $(1\,630.5 \pm 2.0\%)$ K,试验件表面冷壁热流密度为 $(1\,416.3 \pm 9.2\%)$ kW/m²,试验件表面压力为 $(431.5 \pm 2.1\%)$ kPa。

试验调试过程中主要测量气流总温、试验件表面冷壁热流密度和表面压力。冷壁热流密度的测量主要是为了获取对应于该流场参数的材料表面加热率情况。

气流总温利用总温探头测量。总温探头由一对 B 型热电偶和外径为 $\Phi 4$ mm 的双孔陶瓷管组成,热电偶的两根热偶丝分别穿过双孔陶瓷管的两个孔。热电偶的测温端由储能焊机焊接形成热结点,陶瓷管紧固在混合稳压室侧壁的测温孔内,热电偶的热结点与混合室内的高温气流接触,用于测量气流的总温。

试验件表面的冷壁热流密度采用瞬态热容量量热计^[7-8]测量。该种量热计是由高导热率的无氧铜圆柱量热塞块和 K 型热电偶组成。由于量热响应只与量热块的几何尺寸和物理特征有关,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为:

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

式中, q_{ecw} 为量热计测量的热流值, $C_{p,Av}$ 为量热块平均比热容, ρ 为量热块密度, δ 为量热块质量, dT/dt 为量热块背面温升梯度。与试验件外观尺度相同的测试模型上布置了 9 个冷壁热流测点,具体测点位置见图 3。

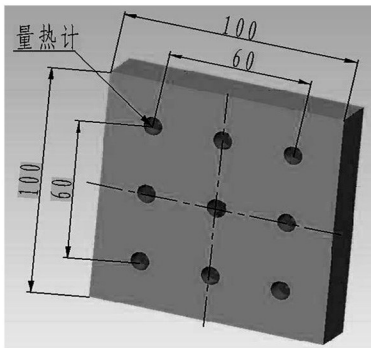


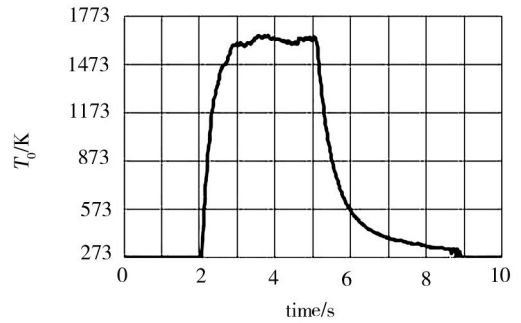
图 3 量热计的安装位置

Fig. 3 Installation positions of calorimeters

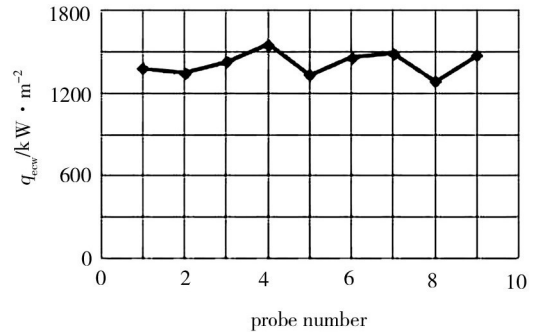
试验件表面压力测点位置与冷壁热流密度测点位置相同,共测量 9 个表面压力值。采用压力探头后接量程 0 ~ 500 kPa 绝对压力传感器(精度为 0.1% F.S(量程))测得。

3 试验流场参数测量结果

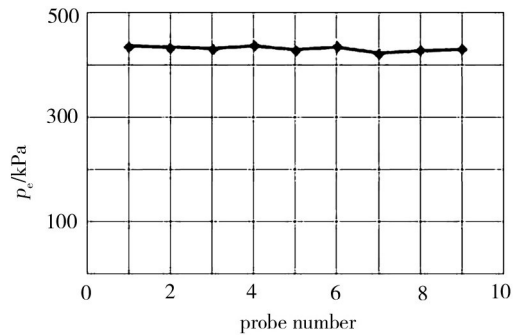
试验调试过程中主要测量气流总温、试验件表面冷壁热流密度和表面压力,具体试验结果如图 4 所示。冷壁热流密度的测量主要是为了获取对应于该流场参数的材料表面加热率情况。测量的来流总温为 $(1\,630.5 \pm 2.0\%)$ K,试验件表面冷壁热流密度为 $(1\,416.3 \pm 9.2\%)$ kW/m²,试验件表面压力为 $(431.5 \pm 2.1\%)$ kPa。



(a) 来流总温



(b) 模型表面热流密度



(c) 模型表面压力

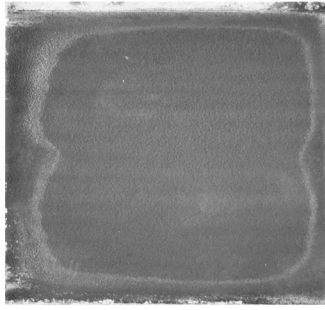
图 4 试验状态测量结果

Fig. 4 Result of test condition

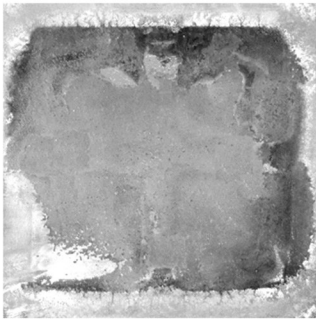
4 试验结果

经过 600 s 考核试验后,背面有高辐射涂层的

TBC 隔热材料的受热面和背面状态见图 5。试验后, 受热面的热障涂层与金属基材完好, 未出现热障涂层脱落和明显烧蚀的情况, 背面的高辐射涂层材料也完好。



(a) 受热面



(b) 背面

图 5 试验后模型受热面和背面状况

Fig. 5 Heating and rear surface after test

采用 K 型热电偶测量了位于双模型矩形湍流导管两侧、背面有高辐射涂层和没有高辐射涂层的 TBC 隔热材料的背面温度, 测量结果见图 6。当温度达到平衡时, 背面有高辐射涂层和没有高辐射涂层的 TBC 隔热材料的背面温度分别为 1 147.2 和 1 228.3 K。背面喷涂了 20 μm 的高辐射涂层后, TBC 隔热材料的背面温度降低了 81.1 K。

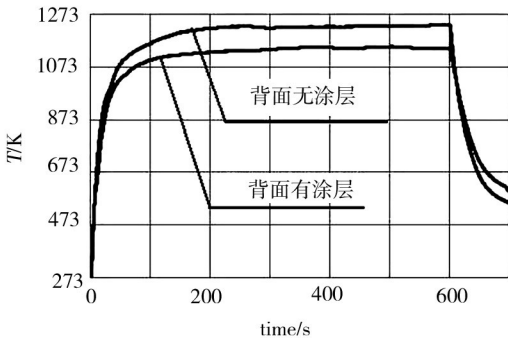


图 6 有无高辐射涂层模型的背面温度结果

Fig. 6 Rear temperature of model with and without rear coating

K 型热电偶直接测量的背面温度数据和 MA2SC

单色红外测温仪间接测量的隔热材料背面温度数据见图 7。平衡时, 两种测温方式测量的背面温度分别为 1 147.2 和 1 130.6 K。导致两种测温方式测量结果有差异的原因是预先设定的背面材料的光谱发射率与实际值有偏差。

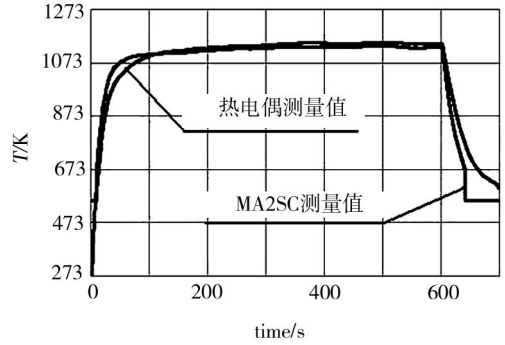


图 7 模型背面温度测量结果

Fig. 7 Rear temperature of model

单色红外测温仪需要预设材料表面的光谱发射率, 预设光谱发射率偏差引起的温度测量偏差满足以下关系式^[9]:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_F}}{\varepsilon_{\lambda_F}} \cdot T_F^2 \quad (2)$$

$$\Delta T = T - T_F \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_{\lambda_F} = \varepsilon_{\lambda_F} - \varepsilon_{\lambda} \quad (4)$$

式中, ΔT 为 TBC 隔热材料背面温度真实值 T 和单色红外测温仪测量值 T_F 的偏差; λ 为单色红外测温仪的工作波长, MA2SC 单色红外测温仪的工作波长为 1.6 μm ; c_2 为普朗克第二辐射常数, $1.438\ 79 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; $\Delta \varepsilon_{\lambda_F}$ 为 TBC 隔热材料背面高辐射涂层的光谱发射率 ε_{λ} 与预先设定光谱发射率 ε_{λ_F} 的偏差。

以热电偶直接测量值作为 TBC 隔热材料背面温度的真实值 T , 通过公式 (2) ~ (4) 可以得到背面高辐射涂层的光谱发射率随温度的变化关系:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda_F} \cdot \left[1 - \frac{c_2}{\lambda T_F} \left(\frac{T}{T_F} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

计算后得到的变化关系曲线见图 8。从图 8 可以看出: 在 1 103 ~ 1 153 K 时, TBC 隔热材料的背面高辐射涂层的光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda} (\lambda = 1.6 \mu\text{m})$ 为 0.89 ~ 0.77。随着温度 T 升高, ε_{λ} 呈逐渐下降趋势。

TBC 隔热材料的背面高辐射涂层的光谱发射率 ε_{λ} 测量过程中的误差主要由热电偶的测量值 T 和单色红外测温仪测量值 T_F 产生。其中, $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 的 K 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 5 期

型热电偶在 400 ~ 1 100℃ 的测量精度为 ±0.4% , MA2SC 单色红外测温仪在 450 ~ 2 250℃ 的测量精度为 ±0.3% ,对式(5)引入误差分析:

$$\delta\varepsilon_\lambda = \frac{\partial\varepsilon_\lambda}{\partial T} \cdot \delta T + \frac{\partial\varepsilon_\lambda}{\partial T_F} \cdot \delta T_F \quad (6)$$

式中, $\delta\varepsilon_\lambda$ 、 δT 和 δT_F 分别为背面高辐射涂层的光谱发射率 ε_λ 、K 型热电偶测量值和 MA2SC 单色红外测温仪测量值的绝对误差。

进一步推导简化后得到 ε_λ 的相对误差关系式:

$$\sigma\varepsilon_\lambda = \frac{\delta\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_\lambda} = \frac{\frac{\delta T}{T} + \left(\frac{T_F}{T} - 2\right) \cdot \frac{\delta T_F}{T_F}}{1 - \frac{T_F}{T} - \frac{\lambda T_F^2}{c_2 T}} \quad (7)$$

式中, $\sigma\varepsilon_\lambda$ 为 ε_λ 的相对误差。由式(7)可以得到 $\sigma\varepsilon_\lambda$ 随温度的变化关系见图 9。可看出:在 1 103 ~ 1 153 K, 测量的 $\sigma\varepsilon_\lambda$ 为 ±0.96%。随着温度 T 升高, $\sigma\varepsilon_\lambda$ 略有上升。

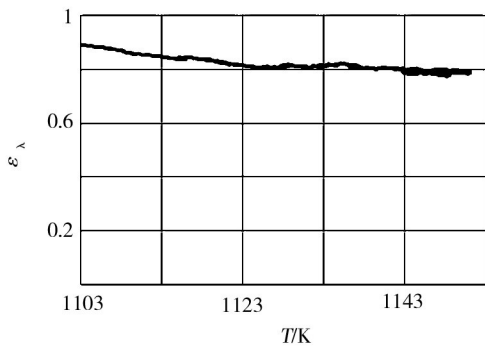


图 8 背面高辐射涂层的 $\varepsilon_\lambda - T$ 图

Fig. 8 $\varepsilon_\lambda - T$ of high-emissivity rear coating

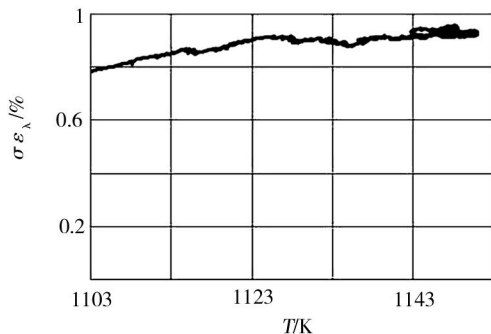


图 9 背面高辐射涂层的 $\sigma\varepsilon_\lambda - T$ 图

Fig. 9 $\sigma\varepsilon_\lambda - T$ of high-emissivity rear coating

5 结论

采用等离子电弧加热器双模型矩形湍流导管试验技术模拟了发动机的内流热环境,对背面有高辐射涂层的发动机 TBC 隔热材料进行了热防护性能考核。利用改进的模型安装方法,满足了 TBC 隔热材料背面高辐射涂层对大气环境的辐射散热要求。

采用 K 型热电偶和单色红外温度仪测量了背面高辐射涂层材料的温度。利用以上两种测量方式得到的该高辐射涂层材料的光谱发射率 ε_λ 随温度 T 的变化关系。试验结果表明:在 1 103 ~ 1 153 K 时,该高辐射涂层材料的 ε_λ ($\lambda = 1.6 \mu\text{m}$) 为 0.89 ~ 0.77, 相对误差 $\sigma\varepsilon_\lambda$ 为 ±0.96%;随着温度 T 升高, ε_λ 呈逐渐下降趋势,但是 $\sigma\varepsilon_\lambda$ 略有上升。

参考文献

- [1] Amone A, Bonaiuti D, Focacci A. Parametric optimization of a high-lift turbine vane [R]. ASME GT 2004-54308, 2004
- [2] 文生琼,何爱杰,王皓. 热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):59-63
- [3] Levi C G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004(8): 77-91
- [4] 蒋劲. 超燃冲压发动机燃烧室再生冷却研究[D]. 西北工业大学,2006
- [5] 涂建强,刘德英,陈连忠. 内流热环境的热流模拟方法[J]. 宇航材料工艺,2009,39(2):30-33
- [6] 涂建强,陈连忠,王琴,等. 发动机燃烧室内壁材料热环境的气动热试验模拟技术研究(英文)[J]. 推进技术,2013,34(4):512-519
- [7] 陈连忠. 塞块式瞬态量热计测量结果修正方法的研究[J]. 计量学报,2008,29(4):317-319
- [8] ASTM International Designation: E 457-96. Standard test method for measuring heat-transfer rate using a thermal capacitance (slug) calorimeter[S]. USA: American Society for Testing Materials (ASTM). Annual book of ASTM standards. ,1996
- [9] 吕崇德. 热工参数测量与处理[M]. 北京:清华大学出版社,2001: 148-153

(编辑 任涛)