

电弧加热器驻点烧蚀/侵蚀试验技术

欧东斌 陈连忠 曲德军 陈峰 张骞

(中国航空气动力技术研究院,北京 100074)

文摘 介绍了在电弧加热器试验设备上进行复合材料烧蚀/侵蚀试验技术,通过改进电弧加热试验设备和粒子播发系统,将石墨粒子均匀注入到高压混合室中,与高温空气混合后经过超声速粒子加速喷管形成烧蚀/侵蚀试验流场,对驻点模型进行试验,同时建立了相应流场参数的测试、计算方法。并对 C/C 和含钨 C/C 防热复合材料的抗粒子侵蚀性能进行了初步研究。结果显示有粒子流场的均匀性和重复性较好,能满足材料的烧蚀/侵蚀考核试验要求,且含钨 C/C 材料的抗粒子侵蚀性能高于 C/C 材料。

关键词 烧蚀/侵蚀,电弧加热器,复合材料

Investigation of Aeroheating Ablation/Erosion Experiment of Composite Materials in Arc-Heater

Ou Dongbin Chen Lianzhong Qu Dejun Chen Feng Zhang Qian

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract The aeroheating ablation and erosion experiment of composite materials in arc-heater was introduced in this paper. By means of improving arc heating test facility and dust-injection system, a prescribed amount of graphite dust particles were injected into the high pressure arc-heater plenum, where these particles were mixed with the high temperature heater air and then drag accelerated through the heater supersonic nozzle to impact the heated nosetip test particles. The measurement and calculation methods of flow field parameters were established at the same time. And then, this paper briefly describes the particle erosion performance of C/C and WC-C/C thermal shield composite materials. The results show that the flow field with particles can satisfy the needs of ablation and erosion experiment because of its excellent performance, and the erosion performance of WC-C/C is better than that of C/C on arc heating conditions.

Key words Ablation/erosion, Arc-heater, Composite material

1 引言

高超声速飞行器在再入大气层过程中除了要经受近万度的高温和很高压下的烧蚀外,还要经受空气中的雨滴、冰晶、尘埃等粒子的高速撞击,飞行器上所选择的防热材料要求有很高的力学性能、抗烧蚀性能外,还要求有很高的抗粒子侵蚀性能。

文献[1]显示,可进行防热材料抗粒子侵蚀性能试验的方法有很多种,如固体火箭发动机烧蚀/侵蚀试验;固定靶材,由二级轻气炮发射液体粒子或固体粒子的单粒子碰撞侵蚀试验;在大气层中进行的由小型火箭发射的自由飞行侵蚀试验;固定雨屏,由二级轻气炮发射模型的弹道靶侵蚀试验;电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀试验等。但从试验条件对真实环境的模拟程度和试验经费等方面考虑,目前大量选用的一般为电弧加热器粒子烧蚀/侵蚀试验。

20世纪70到80年代,美国在电弧加热器上进行

了大量的粒子烧蚀/侵蚀试验研究^[2-3],主要是将碳粒子注入到高温电弧射流中形成耦合的烧蚀/侵蚀流场环境。本文通过改进电弧加热试验设备和粒子播发系统,将石墨粒子均匀注入到高压混合室中,与高温空气混合后经过超声速粒子加速喷管形成烧蚀/侵蚀试验流场,对驻点模型进行试验,同时建立相应流场参数的测试、计算方法。并对 C/C 和含钨 C/C 防热复合材料的抗粒子侵蚀性能进行初步研究,验证该粒子侵蚀流场的均匀性和重复性。

2 试验设备

当高速粒子正面撞击飞行器头部驻点区域材料时,材料侵蚀率与入射粒子动能通量即粒子相对运动速度、粒子浓度、撞击持续时间等有关。利用电弧加热器进行驻点烧蚀侵蚀试验的基本方法是在电弧加热器超声速喷管的入口注入石墨粒子,粒子经喷管加速后撞击防热材料,产生侵蚀现象,其优点是在实验中可以

同时模型侵蚀/烧蚀现象,一般采用驻点实验技术,主要模型参数有气流总焓、驻点压力及粒子动能通量等。

采用管状电弧加热器,锥形粒子加速喷管进行,在距离喷管出口一定距离的中心轴线上,放置试验模型,模型为圆柱体,试验布局示意图图1。

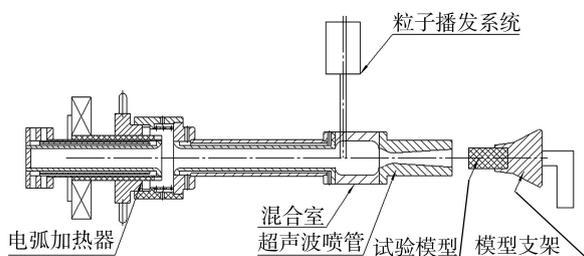


图1 驻点烧蚀/侵蚀试验布局示意图

Fig.1 Sketch of ablation/erosion experiment facility

在电弧加热器粒子烧蚀/侵蚀试验中,对注入粒子材料的选择应尽量满足如下要求:在弧室和加速喷管中,承受高温而不至于熔化,在加热条件下和碰撞过程中,不致破损;在高温空气中不发生强的热化学烧蚀;具有较低的密度,跟随性较好;外形尽可能呈球状。曾使用过的工业用氧化铝粒子由于熔点较低,试验中其表面处于熔融状态,在喷管流动中结团,一般

不再使用。热解石墨具有3 500℃以上的升华温度和较小的密度,但加工出的外形多数是不规则球形,因此在参数计算中应利用非球形粒子关系进行修正。

粒子播发系统的作用是将粒子以一定的质量流率均匀地播发到喷管前混合室内的高温气流中去。通过改进在高焓状态下的粒子播发方式,能使石墨粒子顺利地注入到加热器内,并且能和高温空气均匀混合,具有较好的重复性,从而保证了试验状态参数的重复性。粒子流量通过压差和节流孔大小来控制并在试验前进行多次标定。粒子播发器及粒子播发前后流场照片见图2、图3。

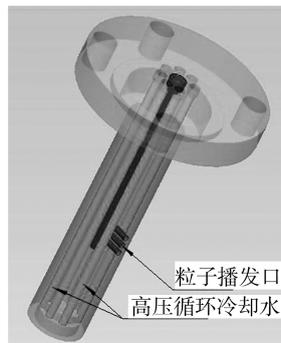
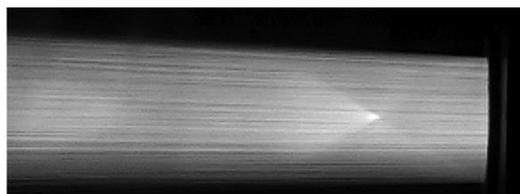


图2 粒子播发器示意图

Fig.2 Sketch of dust-injection system



(a) before



(b) after

图3 粒子播发前后流场照片

Fig.3 Photographs of flow field

3 试验参数的测定和计算

为了确保电弧加热器提供的流场参数符合要求,在模型烧蚀/侵蚀试验前对气流总焓、驻点压力、粒子速度、粒子浓度等参数进行了测试和计算。

3.1 气流总焓 H_0

在超声速电弧加热器中,高温气流在喷管喉道处达到声速。利用这一条件,从高温气流一维等熵平衡流动的方程出发,采用气流平衡声速流法确定总焓(平均容积焓):

$$H_0 = K \times \left(\frac{p_0 \cdot A^* \cdot C_d}{\dot{m}} \right)^{2.519} \quad (1)$$

式中, K 为常数, p_0 为加热器弧室压力, A^* 为喷管喉道面积, \dot{m} 为空气质量流量, C_d 为流量系数,可用冷气流量进行标定,一般取0.95-0.98。冷气流量由孔板流量计配以差压传感器和压力传感器或用安装在气路上的节流装置测得。

3.2 驻点压力 p_s

驻点压力采用水冷皮托压力探头后接压力传感器测得。

3.3 粒子直径 D_p

通过三分元振动筛,选择120目、200目筛网进行过滤,所用石墨粒子直径:80-120 μm 。

3.4 粒子速度 V_p

粒子速度是通过理论计算得出的,它与气流参数、加速喷管和粒子大小及质量等参数有关。在给定的流场中,粒子的速度由下列加速度方程得到^[4]:

$$\frac{dV_p}{dx} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_g C_D}{D_p \rho_p V_p} (V_g - V_p)^2 \quad (2)$$

式中, C_D 为粒子阻力系数,考虑粒子非球形度的影响,对非球形粒子的阻力系数可按式给出:

$$C_D = 2.42(28 \text{Re}^{-0.85} + 0.48) \quad (3)$$

利用Runge-Kutta方法求解由以上方程和喷管一维气流方程组成的微分方程组,对已知喷管几何形状和气流初始参数,可以计算出粒子速度。

3.5 粒子浓度 C_c

粒子浓度是按下式计算得出:

$$C_c = \frac{\dot{M}_p}{V_p \cdot A_e} (1 - \xi)^3 \quad (4)$$

式中, \dot{M}_p 为粒子流量, 是通过实际动态条件下标定 (即热标) 出来的。 ξ 为考虑石墨粒子在加速过程中由于受到热和力的影响其直径减小的修正因子。

3.6 抗侵蚀系数 C_N 和质量侵蚀比 G

在粒子侵蚀计算中, 常引入抗侵蚀系数 C_N 和质量侵蚀比 G 的概念, C_N 表示单位时间侵蚀掉模型单位质量所需的入射动能, 其定义为:

$$C_N = \frac{E_p}{\dot{m}_{2t}} = \frac{\frac{1}{2} C_c V_p^3}{\dot{m}_{2t}} \quad (5)$$

式中, E_p 表示单位时间撞击模型单位面积上的粒子动能, 称之为粒子动能通量。

$$\text{质量侵蚀比定义为: } G = \frac{\dot{m}_{2t}}{\dot{m}_p} \quad (6)$$

式中, \dot{m}_p 为模型截面单位面积上的粒子流量, \dot{m}_{2t} 为模型质量侵蚀率, 由于喷管出口直径是 50 mm, 侵蚀模型横截面直径是 30 mm, 故在粒子流量 \dot{m}_p 的基础上进行面积系数修正得出。

为了适应较宽的模拟范围, 分别选择了两套粒子加速喷管, 调试出两个状态, 选择两种类型的试验模型 (C/C 和 z 向纤维含有钨丝的含钨 C/C) 进行验证实验, 流场参数测试结果见表 1。

表 1 流场参数测试结果

Tab. 1 Measured parameters of flow field

状态	P_s /MPa	H_0 /MJ·kg ⁻¹	V_p /m·s	C_c /g·m ⁻³	E_p /J·(cm ² ·s) ⁻¹
1	0.8	5.0	1400	1.30	190
2	0.8	7.0	1800	0.70	230

4 试验过程和结果分析

首先开启电弧加热器, 流场稳定后将粒子均匀播发, 当形成均匀、稳定粒子侵蚀流场后, 通过模型送进支架将模型快速送入流场, 相比于无石墨粒子的纯烧蚀试验, 在烧蚀/侵蚀试验过程中, 烧蚀/侵蚀产物四处飞溅, 两种材料均呈现明显烧蚀/侵蚀现象 (图 4)。

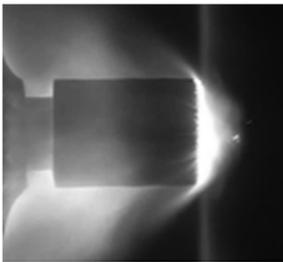
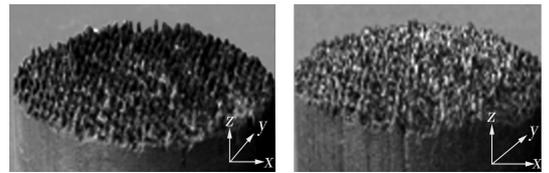


图 4 模型试验过程照片

Fig. 4 Ablation/erosion test under arc heater

从图 5 可以看出, 两种材料试验后其 z 向纤维束长度明显高于 xy 向碳布, 说明 z 向纤维束抗粒子侵蚀能力高于 xy 向碳布; 同时在两个试验状态下, 模型试验后均能基本保持平头外形, 说明粒子流场基本均匀和可重复, 含钨 C/C 材料因其内部渗钨, 烧蚀后表

面有明显黄色氧化物, 结果见表 2。



(a) C/C (b) 含钨 C/C

图 5 模型侵蚀试验后照片

Fig. 5 Photographs of models after ablation/erosion test

表 2 材料烧蚀/侵蚀试验结果

Tab. 2 Results of ablation/erosion test

状态	模型	$\Delta m/t$ /g·s ⁻¹	$\Delta L/t$ /mm·s ⁻¹	G	C_N
1	C/C	13.22	8.07	9.5	106
	WC-C/C	15.41	6.64	11.2	89.6
2	C/C	16.17	8.39	15.3	110
	WC-C/C	19.04	8.23	19.1	88.3

由表 2 可见, 含钨 C/C 材料比 C/C 材料驻点线侵蚀率明显偏低, 抗粒子侵蚀性能要好, 这是由于高温下 WC 已由脆性材料变为韧性材料, 使其具有较为优异的抗侵蚀特性。但其抗侵蚀系数却低于 C/C 材料, 这是因为抗侵蚀系数 C_N 的概念是侵蚀掉单位质量的目标所消耗的能量, 由于含钨 C/C 材料密度较大 (约 2.7 g/cm³), 较 C/C 材料密度 (约 1.9 g/cm³) 高出很多, 故含钨 C/C 材料与 C/C 材料 C_N 的差距较线侵蚀率不一致, 这也说明对以烧蚀/侵蚀量为重要性能指标的航天器耐热材料, 单独以 C_N 值考核材料的抗粒子侵蚀性能结果不直观, 容易造成误解, 尤其在材料密度存在显著差异情况下更是如此^[4]。

5 结论

(1) 改进了试验设备和粒子播发系统, 建立了一套材料烧蚀/侵蚀试验系统。

(2) 试验流场的均匀性和重复性较好, 能满足材料的烧蚀/侵蚀考核试验要求。

(3) 在调试烧蚀/侵蚀条件下, 含钨 C/C 材料比 C/C 材料驻点线侵蚀率低, 抗粒子侵蚀性能要好, 但以抗侵蚀系数 C_N 表征不同耐热材料抗粒子侵蚀能力的大小不具有直观性。

参考文献

[1] 王俊山. 耐热复合材料抗粒子侵蚀特性研究[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(5): 32-35

[2] Smith D M, Carver D B, Knudsen R P. Reentry erosion testing of USAF strategic systems nosetip materials in the AEDC heat-H1 high-enthalpy arc facility//Proceedings of the 2004 AIAA Missile Sciences conference, 2004

[3] Smith D M, Felderman E J. Aerothermal testing of space and missile materials in the arnold engineering development center arc jet facilities, AIAA-2006-3293

[4] 罗建江, 彭一川, 肖泽强. 短管中粉气两相流粉粒速度的实验研究[J]. 化工冶金, 1994, 115(8): 247-251

(编辑 李洪泉)