

三维四向石英/酚醛复合材料烧蚀性能的实验研究

杨汝森 刘德英 王岳广

(北京空气动力研究所 北京 100074)

摘 要 介绍了利用最短长度的轴对称拉伐尔喷管,在 FD-04D 电弧加热器上对三维四向石英/酚醛复合材料进行的驻点烧蚀实验,并利用多元线性回归分析的方法,拟和出材料的质量烧蚀率与气流总焓和驻点压力的关系式,即 $\dot{m}_t = aH_s^b P_s^c$ 。在一定的范围内,利用此关系式,可以很方便地计算出这种石英/酚醛复合材料的质量烧蚀率。

关键词 三维四向石英/酚醛复合材料,质量烧蚀率,回归分析

Experimental Study of Ablation Properties of Three-Dimensional Silica Reinforced Composites

Yang Rusen Liu Deying Wang Yueguang

(Beijing Institute of Aerodynamics Beijing 100074)

Abstract This paper presents ablation experiments on three-dimensional silica reinforced composites at the stagnation point performed in FD-04D arc heater with minimum length axisymmetric Laval nozzles, and relations between total mass loss rate of the material and total enthalpy and stagnation pressure using linear regression analysis. The relational expression is $\dot{m}_t = aH_s^b P_s^c$. In a certain range, the mass loss rate of this type of silican reinforced composites can be easily calculated using this regression relation.

Key words Three-dimensional silicon matrix composites, Mass loss rate, Regression analysis

1 引言

三维四向石英/酚醛复合材料是国内新近研制成功的一种烧蚀材料,它与高硅氧相比,在某些力学性能上有其明显的优点,而其烧蚀性能还不完全清楚。为了更好地将这种材料应用于某种型号,必须对它的烧蚀性能做更加深入的研究。基于此种目的,我们分别用这种烧蚀材料的 25 mm、30 mm 圆柱形模型,在 FD-04D 电弧加热器上做驻点烧蚀实验。

2 实验装置

驻点实验装置主要是一个拉伐尔喷管,喷管的前端与加热器的出口相连接,在距离喷管出口一定距离处,放置圆柱形模型,两者中心在一条直线上。如图 1 所示。

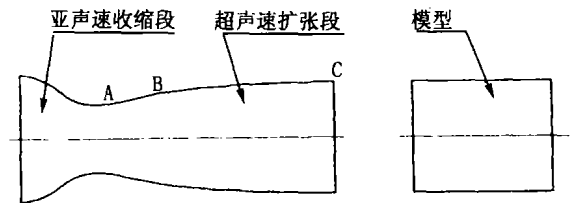


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experiment apparatus

从电弧加热器流出的高温气体,经过一个曲线型轴对称超声速喷管加速后,以一定的马赫数流出喷管,对模型进行驻点烧蚀。喷管是用水冷铜制作而成的,喷管喉部型面的确定主要是凭设计经验和技巧。本次实验喷管的亚声速收缩段采用圆弧形式过渡,扩张段的 AB 部分是一圆锥面,BC 部分是一

收稿日期:2001-08-26

杨汝森,1972 年出生,硕士,主要从事复合材料烧蚀性能实验研究工作

型面, B点对应的马赫数为 M_0 , C点对应的马赫数为 M , 从 M_0 到 M (包括 M_0, M) 取 50 个点, 即 $M_k = M_0 + k(M - M_0)/49$ ($k = 0, 1, \dots, 49$), 利用最短长度法^[1], 确定出曲线 B 到 C 之间 48 个点的位置, 最后利用描点法, 确定出曲线 BC。利用这种方法计算出来的喷管, 扩张段长度最短, 气流总焓损失最小, 并且出口处的超声速气流达到均匀状态, 以利于高温气体对模型进行均匀烧蚀。

喷管的出口直径与模型的直径大小一致。根据模型直径的大小, 我们总共设计了三个拉伐尔喷管, 以便调试出多个状态, 对模型进行不同状态下的烧蚀实验。喷管的具体参数如下: (1) 出口直径 $d = 25$ mm, $Ma = 2.25$; (2) 出口直径 $d = 25$ mm, $Ma = 2.0$; (3) 出口直径 $d = 30$ mm, $Ma = 2.5$ 。

3 参数测量

3.1 气流总焓测量

在材料的烧蚀实验中, 气流总焓对材料的烧蚀性能有很大的影响, 因此气流总焓是一个非常重要的模拟参数。本次实验采用平衡声速流法来确定喷管喉道前的气流平均容积焓。在假定一维、等熵、平衡流的前提下, 气流的总压、质量流量和总焓三者符合关系式:

$$H_s = 0.04532 \times \left(\frac{P_0 A^* C_d}{G} \right)^{2.519}$$

其中 H_s 为气流总焓, P_0 为气流总压, A^* 为喷管喉道横截面积, C_d 为喉道流量系数, G 为气体的质量流量。气体的质量流量采用临界声速喷管流量法测量。

3.2 压力测量

电弧加热器的弧室总压采用圆柱梁应变式压力传感器来测量; 模型表面的驻点压力也采用圆柱梁应变式压力传感器并配合自行设计的水冷压力探头来测量。压力探头所处的位置与模型的位置一样, 以便能够更加真实地测量出模型表面烧蚀时的驻点压力。应变式压力传感器采用波纹管作为压力—力转换元件, 环行梁作为承力元件, 温度自偿丝式应变片作为应力敏感元件, 它把压力信号转换成电信号。用计算机采集系统记录实验数据。

通过测量驻点压力, 发现在距离喷管出口 0 ~ 20 mm 的范围内, 压力变化不大, 可以将模型放在距离喷管出口 10 mm 的位置做定点烧蚀, 而不需要在烧蚀过程中必须将模型送进。

3.3 质量烧蚀率的测量

模型烧蚀前后的质量采用精度为 0.1 g 的天平
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

测量, 烧蚀时间采用精度为 0.1 s 的电秒表测量, 利用关系式 $\dot{m}_t = m/t$ (m 为质量损失量, t 为时间) 求得模型的质量烧蚀率。

4 实验结果和分析

本次实验我们假定喷管内的气体流动是一元等熵平衡流动, 略去了喷管内气体流动中化学反应不平衡的影响。由于喷管的扩张段是采用最短长度法设计而成的, 所以气流总焓损失很小, 可以认为喷管出口处的气流总焓近似等于喉道前的气流总焓。实验过程中, 根据三个压力、三个焓的组合, 总共调试出九个状态, 每个状态试烧了三个模型, 把三个模型的平均质量烧蚀率作为该状态的质量烧蚀率。从烧蚀后的模型来看, 表面基本上是平坦的, 个别模型表面有轻微的凸起, 但整个表面上没有斑斑点点的凹坑, 这主要与材料的三维四向编织工艺有关系。

文献[2]认为, 烧蚀材料的质量烧蚀率与气体热流密度的平方根成正比, 而气体的热流密度又与喷管直径的平方根成反比, 所以可以推得烧蚀材料的质量烧蚀率与喷管出口直径的四次方根成反比, 即 $\dot{m}_t \propto \frac{1}{\sqrt[4]{R}}$ 。利用此关系式, 将直径为 30 mm 的模型质量烧蚀率换算成直径为 25 mm 的模型质量烧蚀率。于是每个模型都相当于直径为 25 mm, 并且是在出口直径为 25 mm 的喷管上进行烧蚀实验, 实验数据就便于整理。

实验结果仅仅是九种状态下的结果, 如果将材料的质量烧蚀率整理成它与气流总焓和驻点压力的关系式, 就可以将实验结果推广应用。根据分析, 材料的质量烧蚀率与气流总焓和驻点压力可能符合指数关系^[2], 即 $\dot{m}_t = aH_s^b P_s^c$, 对关系式两边求对数, 得 $\ln \dot{m}_t = \ln a + b \ln H_s + c \ln P_s$, 这是一个线性关系式, 有两个自变量和三个未知数。根据九个状态下的实验数据, 利用多元线性回归分析^[3], 得到三个未知数 a, b, c 的值。线性关系式为 $\ln \dot{m}_t = -1.5654 + 1.19 H_s + 0.91 P_s$, 相关系数 $R = 0.9965$, $t_H = 15.3041$, $t_{P_s} = 23.9150$ 。显著水平 $\alpha = 0.05$ 的情况下, 对回归系数和回归方程分别作显著性检验, 经查分位表可知, H_s, P_s 对 $\ln \dot{m}_t$ 起显著作用, 并且回归方程的线性也是显著的。最后得到 \dot{m}_t 与 H_s, P_s 的关系式为: $\dot{m}_t = 0.2090 H_s^{1.19} P_s^{0.91}$ 。将由拟和关系式得到的质量烧蚀率与实验得到的质量烧蚀率做差值, 即 $m = |m_{\text{拟}} - m_{\text{实}}|$, 将 m 与 $m_{\text{实}}$ 的商作为误差, 则有 $\text{error} = \frac{|m_{\text{拟}} - m_{\text{实}}|}{m_{\text{实}}} \times 100\%$ 。经过计算得到

平均误差为 3.2%。以 $m_{\text{拟}}$ 为横坐标, $m_{\text{实}}$ 为纵坐标作图,可以看出,这些点均匀地分布在 45° 线的两侧(见图 2)。

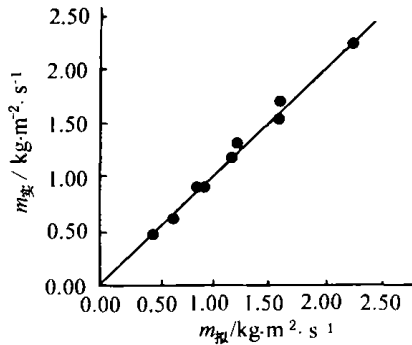


图 2 三维四向石英/酚醛复合材料质量烧蚀率的相互关系

Fig. 2 Mass loss rate correlation of three-dimensional silica reinforced composites

5 结论

通过对三维四向石英/酚醛复合材料的驻点烧蚀实验,得到了这种石英/酚醛复合材料的驻点烧蚀性能,利用多元回归分析,拟和出了材料的质量烧蚀率与气流总焓和驻点压力的关系式: $\dot{m}_t = 0.2090 H_s^{1.19} P_s^{0.91}$ 。在气流总焓大于 4.1 MJ/kg 且小于 7.5 MJ/kg、驻点压力大于 0.35 MPa 且小于 1.10 MPa 的范围内,可以利用此关系式计算三维四向石英/酚醛复合材料在驻点条件下的质量烧蚀率。

参考文献

- 1 Lucian Z D. Minimum length axisymmetric laval nozzles. AIAA Journal, 1975; 13(4): 520 ~ 521
- 2 Nevin K H, Carrol F C. Feasibility of standard evaluation procedures for ablation materials. NASA CR-379, 1996: 49, 68
- 3 吴翎, 李永乐, 胡庆军. 应用数理统计. 国防科技大学出版社, 1995: 135 ~ 196

专家论坛 策略研讨 前沿动态 创新导向

2002 年材料导报

欢迎订阅 感谢赐稿支持

《材料导报》是综合性材料科技刊物,中国科技论文源统计期刊,CNKI 期刊全文数据库收录期刊。《材料导报》反映材料科技发展动态和国家宏观政策,跟踪材料世界发展前沿和方向,展示国家相关材料计划实施及研究开发新成果,促进高新技术新材料的发展及产业化,为我国材料科技起引导作用。

《材料导报》设有材料科技发展评述、材料科技政策、信息发布、专题评论、新成果转化及产业化、人物专访及专稿、前沿材料介绍、国际动态、读者论坛、快讯、青年学者园地、研究论文选登、高科技园区等栏目,思想活跃,内容充实,实行全方位服务。

《材料导报》的读者对象:从事材料规划、决策的各级领导和管理人员,从事材料研究开发的科研工作者,有关大专院校师生,从事材料生产、应用的工矿企业人员,以及公司领导人员,高新技术开发区领导人员等。

《材料导报》为月刊,每月 15 日出版,每期 19 万字,邮局公开发行。刊号 ISSN 1005-023X; 邮发代号:78-93,定价:10.00 元/月。欢迎订户到当地邮局订购。漏订者可直接向材料导报社补订。

为加强联系,强化刊物的服务功能,使有关的增补材料准确无误地送到读者手中,无论从邮局订阅或直接在我社订阅的订户,都将读者联系卡邮寄《材料导报》社。谢谢合作。

《材料导报》热忱提供广告服务,欢迎四海朋友刊登广告,宣传自我,拓展商机。广告经营许可证:重工商广字 9500517 号。直接向本社补订的订户,请将款汇至 400013 重庆市 2104 信箱,材料导报社

或将订阅款由银行汇至

开户银行:重庆市商业银行七星岗支行

户名:重庆西信天元数据资讯有限公司(材料)

帐号:20109042028

材料导报社电话/电传:(023)63505701

网址: <http://www.mat-rev.com.cn>

E-mail: mat-rev@swic.ac.cn