

碳/石英耐热复合材料烧蚀性能

赵小程 杨凯威

(北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

文 摘 为研究碳/石英耐热复合材料的烧蚀性能,采用电弧加热器和碳/石英平头驻点模型,在不同驻点压力 P_s 、不同热流密度 q 和不同焓值 h_s 的多组合条件下进行了烧蚀试验。针对试验所得数据,利用多元回归分析方法,建立了质量烧蚀率与热流密度、驻点压力、焓值3个参数之间的数学模型,并对模型的合理性进行了检验。结果表明,所建立的3个参数数学模型对试验数据的拟合程度很好,热流密度与质量烧蚀率最为相关;与单参数、2个参数的数学模型相比,3个参数的数学模型对实验数据的拟合效果更好,能很好地反映碳/石英耐热复合材料的烧蚀性能。

关键词 复合材料,质量烧蚀率,热流密度,驻点压力,焓值,多元回归

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2019.05.008

Ablation Properties of Carbon/Quartz Heat-Resistant Composites

ZHAO Xiaocheng YANG Kaiwei

(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076)

Abstract In order to acquire the ablation properties of carbon/quartz composites, the ablation experiment was carried out under the condition of different stagnation pressures, different heat flux and different total enthalpy using the arcing heater and carbon/quartz flat head stagnation model in this paper. Based on the experimental data, the mathematical model between mass ablation rate and the three major factors, namely heat flux, stagnation pressure and total enthalpy is established by using multiple regression analysis method, and the rationality of the model was tested. The results show that the established three-parameter mathematical model has a good fitting degree to the experimental data, and the heat flux is the most relative parameter. Compared with the single-parameter and two-parameter mathematical models, the three-parameter mathematical model has a better fitting effect on the experimental data and can better reflect the ablation properties of the carbon/quartz heat-resistant composites.

Key words Composites, Mass ablation rate, Heat flow density, Stay pressure, Enthalpy, Multivariate regression

0 引言

近年来,随着航空航天、原子能、先进飞行器及材料冶炼技术的不断提升,国内外对于先进耐高温、耐烧蚀复合材料提出了更加苛刻的要求。陶瓷基耐热复合材料(CMC)克服了传统陶瓷材料脆性大的缺点,具有耐高温、抗烧蚀、高温力学性能优良等优点。当前,美国、日本及欧洲等国家为了保持高技术陶瓷基复合材料(CMC)的优势,投入了大量的人力物力进行陶瓷基耐热复合材料(CMC)的研究与开发,目前已进入应用阶段^[1]。比如,X系列飞行器的头锥、翼缘等极高温区域热防护结构就采用了陶瓷基复合材料^[2]。还有,目前美国开发的高超声速航空飞行器(如猎鹰无人驾驶高超声速试验飞行器HTV-2),对

空气动力学提出来更高的要求,它们均有尖锐的前缘,这些部位对材料的要求更为苛刻,一般会用到超高温陶瓷基复合材料来对其进行热防护^[3]。图1给出了碳/石英材料的微观形貌。碳纤维在惰性气体中,即使在2000℃以上的高温,其强度和弹性模量的变化也很小,在航天、飞行器等瞬间或短时高温领域具有很重要的实际使用意义^[4-5]。碳纤维与石英线胀系数相当,二者复合过程中使用的石英基体对碳纤维具有良好的浸润性,在性能与制造工艺上匹配性良好。应用碳纤维增强石英基体,可以使材料具有较高的承载能力、抗冲击能力、抗热震能力,优良的抗烧蚀性能及防热性能,在高温环境下可以保持较稳定的物理化学性质。目前,碳/石英耐热复合

收稿日期:2018-12-16

第一作者简介:赵小程,1997年出生,硕士研究生,研究方向为飞行器热防护技术。E-mail:2463685990@qq.com

材料在国内已经有了较为深入的研究,已应用到飞行器中。

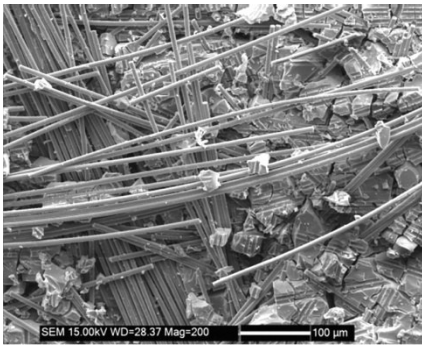


图1 碳/石英防热复合材料微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphology of carbon/quartz heat-resistant composites

材料的烧蚀性能与热环境参数密切相关。梁欢等^[6]研究了硅基材料有效烧蚀与焓值和压力的关系,并给出了相应的数学模型,周燕萍等^[7-8]给出了CF/S-157PF复合材料有效烧蚀焓或质量烧蚀速率与热流密度和烧蚀时间之间的关系式。二者研究的均为2个热环境参数(压力、焓值)或1个热环境参数(热流)对材料烧蚀性能的影响,未研究热流密度、压力、焓值3个参数同时作用下对复合材料质量烧蚀率的影响以及关系式。碳/石英作为一种性能优良的陶瓷基防热复合材料(CMC),国内外对其在不同热环境条件下的烧蚀性能报道文献很少。本文以碳/石英防热复合材料制成的驻点模型为研究对象,采用管状电弧加热器设备完成不同驻点压力 P_s 、不同热流密度 q 和不同焓值 h_s 的多组合条件下该材料烧蚀试验。然后,依据碳/石英防热复合材料的驻点烧蚀试验数据,利用回归分析方法研究热流密度、驻点压力、焓值与质量烧蚀率之间的影响规律。

1 实验

1.1 设备及模型

管状电弧加热器:一种自由弧长的电弧加热器,其前后电极呈管状。

试验模型:由碳/石英防热复合材料制成的驻点模型,其直径为25~30 mm,高30~40 mm。试验过程中采用红外测温仪对驻点表面温度进行测量。

1.2 实验方案

图2为试验装置示意图。安装时,将模型的轴线安装在电弧加热器的中心线上,并使模型截面平行于喷管出口截面,这样可以保证模型烧蚀均匀。然后,按图示位置及方法布置好红外测温仪。热流、压力采用直接测量的方法对外形尺寸相同的试验模型在不同状态下进行测量,气流焓值通过总压流量法计算获得,材料的质量烧蚀率用称重法测得。正

式试验前首先进行流场调试,经过流场调试后,便可进入正式试验。

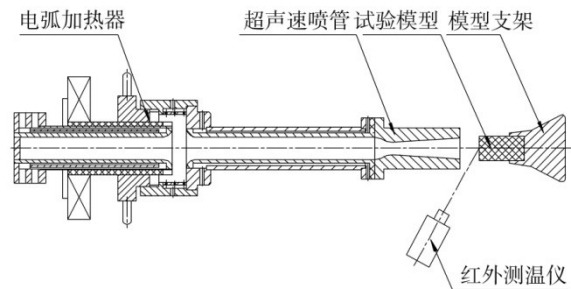


图2 设备及模型安装示意图

Fig. 2 Installation figure of equipment and model

1.3 结果与分析

共进行50余次试验,试验条件及各个试验条件下的质量烧蚀率见表1。图3为不同系列典型状态下材料模型烧蚀后形貌。可以发现,模型在表1试验条件下均发生了烧蚀,烧蚀表面基本保持平坦,烧蚀面形成了白色烧蚀产物即熔融液态层。在较低状态下,液态层附着在烧蚀面,较高状态下液态层在剪切力和压力作用下被吹至模型柱面,高状态下,液态层被直接吹掉。

表1 试验参数记录

Tab. 1 Value of experimental parameters

| 模型编号 | 状态 | 气流焓值 /MJ·kg ⁻¹ | 驻点冷壁 热流密度 /MW·m ⁻² | 驻点压力 /MPa | 质量烧蚀率 /kg·(m ² ·s) ⁻¹ |
|------|-----|------------------------------|-------------------------------------|--------------|--|
| A系列 | I | 6.5 | 10~20 | 0.35~1.05 | 0.7514 |
| B系列 | II | 8 | 18~30 | 0.60~1.25 | 1.0922 |
| C系列 | III | 10 | 20~32 | 0.50~1.25 | 1.1933 |
| D系列 | IV | 13 | 21~34 | 0.47~0.98 | 1.2946 |

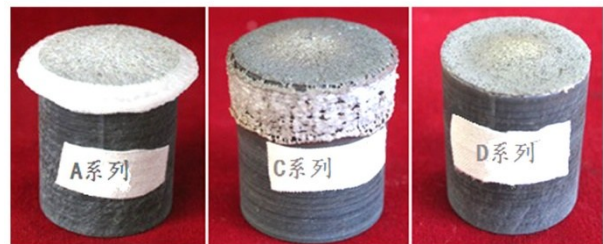


图3 模型烧蚀后形貌

Fig. 3 Models' morphology after ablation

在文献^[6]的研究结果基础上,提出了质量烧蚀率与热流、压力和焓值三参数相关联的指数数学模型,具体表达式为:

$$\dot{m}_1 = a \cdot h_s^b \cdot q^c \cdot p \quad (1)$$

将(1)式两端同时取对数,得到(2)式如下:

$$\ln \dot{m}_1 = \ln a + b \cdot \ln h_s + c \cdot \ln q + d \cdot \ln p_s \quad (2)$$

要确定出(1)式中的系数,只需通过多元线性回

归方法求出(2)式便可。

多元线性回归分析的数学模型为:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{12} + \dots + b_mx_{1m} + v_1 \\ y_2 = b_0 + b_1x_{21} + b_2x_{22} + \dots + b_mx_{2m} + v_2 \\ \dots\dots\dots \\ y_n = b_0 + b_1x_{n1} + b_2x_{n2} + \dots + b_mx_{nm} + v_n \end{cases} \quad (3)$$

(3)式中待求系数有 $m+1$ 个,而方程式的个数有 n 个,对于精密测量,一般要求测量次数 $n>m+1$,这样(3)式构成了矛盾方程组无法求解。为了解决此问题,采用最小二乘原则^[9],用表达式表述为:

$$(y - Xb)^T (y - Xb) = \min \quad (4)$$

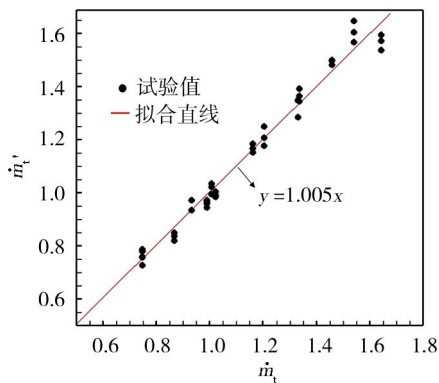
使用 matlab 软件进行回归计算,得到多元线性回归方程为:

$$\ln \dot{m}_i = \ln a + 0.4472 \ln h_s + 0.4027 \ln q + 0.4105 \ln p_s \quad (5)$$

将(6)式中系数回代到(1)式中,得到最终确定出来的数学模型为:

$$\dot{m}_i = a \cdot h_s^{0.4472} p_s^{0.4105} q^{0.4027} \quad (6)$$

图4给出了试验数据的散点分布及拟合直线。拟合直线方程为 $y=1.005x$,近似与直线 $y=x$ 重合,可以看出,式(6)的拟合效果很好。



m_i 表示理论值; m_i' 表示试验值。

图4 散点及拟合直线图

Fig. 4 Scatter point and fit line graph

针对以上模型进行相关性、拟合优度、方程显著性、变量显著性检验。

(1) 变量间相关性检验

皮尔森相关系数是用来反映两个变量线性相关程度的统计量^[10]。皮尔逊相关系数计算表达式为:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right) \quad (7)$$

(2) 拟合优度检验

为了检验描述碳/石英材料质量烧蚀率的多元线性回归方程与数据的拟合程度,可以采取拟合优度检验的方法来说明^[10]。拟合优度检验方法需要构造

一个可以表征拟合程度的指标 R^2 。统计量 R^2 定义为:

$$R^2 = \frac{S_{\text{回}}}{S_{\text{总}}} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{S_{\text{残}}}{S_{\text{总}}} \quad (8)$$

式中, $S_{\text{总}}$ 为总变差平方和, $S_{\text{残}}$ 为残差平方和, $S_{\text{回}}$ 为回归平方和。

(3) 回归模型显著性检验

通过计算统计量 F 值来说明总体上被解释变量与解释变量之间的线性关系是否显著^[10]。其中,统计量 F 定义为:

$$F = \frac{S_{\text{回}} / k}{S_{\text{残}} / (n - k - 1)} \sim F(k, n - k - 1) \quad (9)$$

(9)式说明,统计量 F 服从自由度为 $(k, n - k - 1)$ 的 F 分布。通过查询 F 分布统计表,便可以得出在特定显著性条件下 F 检验的临界值。当统计量 F 的值大于临界值时,即可认为在总体上自变量与质量烧蚀率之间呈显著的线性关系。

(4) 回归系数的显著性检验

回归模型的显著性检验是从总体上对方程的线性关系进行检验,然而,实际上可能会有个别因子对质量烧蚀率没有影响或影响不显著。从应用的角度看,应该设法找出这些影响不显著的因子,并将其从回归方程中剔除。采用回归系数的显著性检验定义统计量 F_j 为:

$$F_j = \frac{\hat{\beta}_j^2 / I^{(jj)}}{Q_e / (n - k - 1)} \sim F_{(1-\alpha)}(1, n - k - 1) \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

对于给定的显著性水平 α ,当检验统计量

$$F_j > F_{(1-\alpha)}(1, n - k - 1) \quad (j = 1, 2, \dots, k)$$

则认为所研究的影响因子是显著的^[7]。

1.4 检验结果

相关系数计算结果如表2所示。其中 X_i 为 $\ln h_s$ 、 $\ln p_s$ 和 $\ln q$ 所代表的样本数据, Y_i 为 $\ln \dot{m}_i$ 所代表的样本数据。由计算结果可以看出,自变量 $\ln h_s$ 、 $\ln p_s$ 与因变量 $\ln \dot{m}_i$ 的相关系数 r 值为 0.40~0.69,可以认为气体焓值、驻点压力与碳/石英质量烧蚀率之间中度相关;自变量 $\ln q$ 与因变量 $\ln \dot{m}_i$ 的相关系数 r 值为 0.7~1.0,认为驻点冷壁热流密度与材料质量烧蚀速率高度相关。结果表明,建立(6)式这样的数学模型满足相应精度要求。

由表3看出,拟合优度检验的计算结果为 $R^2 = 0.9823 > 0.95$,说明数学模型的拟合效果很好;回归模

型显著性检验的 $F=759.8396$, 说明回归模型的显著性良好; 且概率值 $P<0.001$, 总回归方差为 0.0011 , 这些都充分说明了所建立的数学模型对试验数据的拟合程度很好。

表2 相关系数计算结果表
Tab. 2 Calculation value of relativity coefficients

| 自变量 | 与因变量 $\ln m_i$ 的相关系数 r | 结论 |
|-----------|--------------------------|------|
| $\ln h_s$ | 0.5067 | 中度相关 |
| $\ln p_s$ | 0.6171 | 中度相关 |
| $\ln q$ | 0.9958 | 高度相关 |

表3 模型检验结果
Tab. 3 Model test results

| R^2 | F | P | 总回归方差 |
|--------|----------|--------|--------|
| 0.9823 | 759.8396 | <0.001 | 0.0011 |

表4给出了回归系数的显著性检验结果, 结果表明, 3个回归系数的显著性都很好, 其中驻点压力最为显著。

表4 回归系数的显著性检验结果

Tab. 4 The significance test results of regression coefficients

| F_1 | F_2 | F_3 |
|---------|---------|---------|
| 27.0442 | 50.6093 | 19.5417 |

1.5 3个参数模型与单参数、2个参数模型对比

将拟合所得的3个参数数学模型与单参数、2个参数数学模型进行对比, 结果如表5所示。

表5 3个参数模型与单参数、2个参数模型对比
Tab. 5 Comparison of three parameter model with one parameter and two parameter models

| 参数模型 | R^2 | 总的误差平方和 |
|---------------|--------|---------|
| 3个参数(热流、压力和焓) | 0.9823 | 0.0683 |
| 2个参数(热流、压力) | 0.9710 | 0.0976 |
| 单参数(热流) | 0.9480 | 0.1561 |

从表5可以看出, 3个参数数学模型与单参数、2个参数数学模型相比, 对实验数据的拟合效果最好, 计算所得到的总的误差平方和也最小, 能更好地反映碳/石英防热复合材料的烧蚀性能。

2 结论

(1)提出了质量烧蚀率与热流、压力、焓值3个参数相关的数学模型, 并采用数学方法回归出了模型中的各相关系数, 得到了具体的关系式。并对数学模型进行了一系列检验, 其中, 拟合优度检验结果为 $R^2 = 0.9823$, 回归模型显著性检验结果为 $F=759.8396$, 总回归方差为 0.0011 , 回归系数的显著性检验表明3个回归系数都很显著。

(2)研究了3个参数对质量烧蚀率的相关性, 结果表明质量烧蚀率与热流高度相关, 其次是焓值和压力。

(3)将拟合所得的3个参数数学模型与单参数、2个参数数学模型进行对比。结果表明3个参数的数学模型对实验数据的拟合效果最好, 能更好地反映碳/石英防热复合材料的烧蚀性能。

参考文献

- [1] SCHMIDT S, BEYER S, KNABE H, et al. Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications[J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3/9):409-420.
- [2] IMUTA M, GOTOH J. Development of high temperature materials including CMCs for space application[J]. Key Eng. Mat. 1999, 164/165:439-444.
- [3] 李崇俊, 闫联生, 崔红. 航天飞行器热防护系统技术综述[J]. 高科技纤维与应用, 2014(1):19-25.
- [4] WANGA F S, JIB Y Y, YUA X. S, et al. Ablation damage assessment of aircraft carbon fiber/epoxy composite and its protection structures suffered from lightning strike[J]. Composite Structures, 2016, 145:226-241.
- [5] 尹凯俐, 周立娟, 魏春城, 等. 碳纤维增韧 ZrC-SiC 陶瓷基复合材料制备工艺研究现状[J]. 陶瓷学报, 2018(2):132-137.
- [6] 梁欢, 杨凯威, 张杨, 等. 有效烧蚀焓法计算硅基材料烧蚀量分析研究[C]//第四届进入、减速与着陆(EDL)技术全国学术会议, 北京, 2016.
- [7] 周燕萍, 魏莉萍, 郑会保, 等. 复合材料有效烧蚀焓计算模型实验研究[J]. 宇航计测技术, 2012(2):27-29.
- [8] 周燕萍, 魏莉萍, 郑会保, 等. 复合材料质量烧蚀率计算模型实验研究[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(5):78-80.
- [9] 杨惠连, 张涛. 误差理论与数据处理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992.
- [10] 吴孟达, 李兵, 汪文浩. 高等工程数学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.