

复合材料质量烧蚀率计算模型实验研究

周燕萍 魏莉萍 郑会保 孟祥艳 刘运传

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

文 摘 通过对 CF/S-157PF 复合材料进行氧-乙炔烧蚀试验研究, 得到了质量烧蚀率, 并利用多元线性回归方法, 拟合得到了该参数与热流密度和烧蚀时间的数学模型, 即 $M = 0.043 \cdot q^{0.128} \cdot t^{-0.191}$ 。经检验, 该回归模型适用性较好, 预测精度较高, 为复合材料该项烧蚀性能的评估建立了快速、有效、可靠的试验方法。

关键词 氧-乙炔烧蚀, 多元回归, 热流密度, 质量烧蚀率, 数学模型

Experimental Validation of Calculated Model on Mass Loss Rate of Composites

Zhou Yanping Wei Liping Zheng Huibao Meng Xiangyan Liu Yunchuan

(CNGC Institute 53, Jinan 250031)

Abstract In this paper, the important characteristic parameter, namely the mass loss rate, was obtained by the investigating on CF/S-157PF composite under oxyacetylene flame test conditions. And using multiple linear regression, the mathematic model on the mass loss rate and the two major factors, namely the heat flux density and ablation time is as follows: $M = 0.043 \cdot q^{0.128} \cdot t^{-0.191}$. It is verified that, the regression model is very applicable and the forecast accuracy is much better. So the erosion properties of CF/S-157PF composite can be evaluated with this rapid, effective and accurate method in the oxyacetylene flame test.

Key words Oxyacetylene flame, Multiple regression, Heat flux density, Mass loss rate, Mathematic model

0 引言

碳纤维增强 S-157 酚醛树脂 (CF/S-157PF) 复合材料以其高强度、耐高温、抗烧蚀、抗冲击等特点, 被广泛用作结构材料和防热材料。针对此类树脂基烧蚀复合材料的性能评价, 目前地面模拟的实验方法主要有氧-乙炔烧蚀、等离子体烧蚀、电弧风洞等, 其中氧-乙炔烧蚀以装置简单、成本低、操作方便的特点, 成为常用的模拟试验方法, 用于材料配方的筛选和烧蚀性能的初评^[1]。在试验中, 热流密度和烧蚀时间均为影响材料烧蚀性能的主要因素, 其变化直接影响烧蚀性能表征参数值的变化, 所以建立质量烧蚀率与上述两个影响因素的数学模型对预测该类材料在不同热流密度和烧蚀时间的性能变化具有重要意义。本文以 CF/S-157PF 酚醛树脂防热复合材料为研究对象, 建立了质量烧蚀率的计算模型, 在一定范围内为材料烧蚀性能的评价建立了快速、有效、可靠的表征方法。

1 实验

1.1 仪器

YS-IV 型氧-乙炔烧蚀试验机, 陕西电器研究所; 电子天平, BS223S, 赛多利斯。

1.2 试样制备

(1) 原材料

碳纤维, T700, 12k, 日本东丽公司; S-157 酚醛树脂, 中国兵器工业集团第五三研究所。

(2) 制备方法

将 S-157 酚醛树脂基体和增强材料碳纤维按相同的质量比制成预浸料, 晾置一定时间, 经鼓风烘箱预烘后于平板硫化机上模压成型, 制得尺寸 $\Phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱状复合材料烧蚀试样。

1.3 实验方法

参照标准 GJB 323A-96。本烧蚀试验机火焰烧蚀角度为 90° , 火焰喷嘴直径为 2 mm 。试样初始表面到火焰喷嘴距离设置为 10 mm 。选取 5 个热流密度值和烧蚀时间, 对 CF/S-157PF 复合材料试样进行同一烧蚀时间不同热流密度和同一热流密度不同烧蚀时间的实验。利用多元回归分析, 拟合出质量烧蚀率与热流密度、烧蚀时间的数学关系式。

2 结果与讨论

称量 CF/S-157PF 复合材料试样烧蚀前后的质量, 按照公式 (1) 的计算方法^[2], 求得各试样的质量

烧蚀率 M , 具体数据见表 1。

$$M = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t} \quad (1)$$

表 1 CF/S-157PF 复合材料的质量烧蚀率

Tab. 1 Data of mass loss rate on CF/S-157PF composites

试样 编号	热流密度 $q/\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$	烧蚀时间 t/s	质量烧蚀率 $M/\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$	试样 编号	热流密度 $q/\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$	烧蚀时间 t/s	质量烧蚀率 $M/\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
1#	1.54	8	72.0	14#	1.83	25	68.4
2#	1.54	15	64.5	15#	1.83	30	61.5
3#	1.54	20	59.4	16#	4.21	8	83.0
4#	1.54	25	60.3	17#	4.21	15	77.0
5#	1.54	30	56.2	18#	4.21	20	72.2
6#	1.64	8	77.5	19#	4.21	24	66.6
7#	1.64	15	62.8	20#	4.21	30	62.7
8#	1.64	20	68.6	21#	4.26	8	85.7
9#	1.64	25	58.7	22#	4.26	15	76.5
10#	1.64	30	57.0	23#	4.26	20	124
11#	1.83	8	80.3	24#	4.26	24	70.6
12#	1.83	15	66.5	25#	4.26	28	68.4
13#	1.83	20	68.0				

根据文献[3], 结合热流密度和烧蚀时间分别对质量烧蚀率所作的图形来分析, CF/S-157PF 复合材料的质量烧蚀率与热流密度和烧蚀时间的关系可能符合指数关系, 即科布-道格拉斯型函数^[4]:

$$M = A \cdot q^b \cdot t^c \quad (2)$$

式中, q 为热流密度, t 为烧蚀时间。该函数是一非线性化模型, 将其两边取自然对数转化为线性化模型, 即

$$\ln M = \ln A + b \ln q + c \ln t \quad (3)$$

式中有三个未知数 A 、 b 、 c , 一个因变量 M , 两个自变量 q 和 t , 因此考虑利用多元线性回归法求出

表 2 质量烧蚀率回归方程式的检验

Tab. 2 Verification of regression formula on mass loss rate

数据来源	各个回归系数的 T 检验值			相关系数	复决定系数 R^2	方程显著性 F 检验值
	A	b	c			
计算值	-18.2	6.23	-9.51	0.929	0.864	66.5
临界值 ($\alpha = 0.05$)	2.08	2.08	2.08	0.488	-	3.47
临界值 ($\alpha = 0.01$)	2.83	2.83	2.83	0.485	-	5.78

经过 T 检验, 两个显著性水平下回归方程中的各个系数都是显著的; 经过 F 检验, 两个显著性水平下求得的回归方程也都是非常显著的, 从而说明热流密度和烧蚀时间与质量烧蚀率之间的线性关系回归效果显著, 模型总体上是适用的。

同时求得回归方程 (4) 的线性相关系数为 0.929, 所以该回归方程是线性相关的。求得的 R^2 为 0.864, 一般认为 R^2 大于 0.8, 回归模型对样本数据拟合程度较高, 回归方程质量较好。

式中, m_1 为试样原始质量, m_2 为试样烧蚀后质量, t 为烧蚀时间。

CF/S-157PF 复合材料的质量烧蚀率表征关系式。

应用统计分析工具将被解释变量 $\ln M$, 解释变量 $\ln q$ 、 $\ln t$ 的 25 个状态下的数据, 进行多元线性回归分析。一般, 标准化残差绝对值大于 2 的视为离群值, 应予以剔除^[5]。在剔除第 23 组异常数据后, 得到最优回归方程:

$$\ln M = -3.137 + 0.128 \ln q - 0.191 \ln t \quad (4)$$

将线性方程转换为指数方程:

$$M = 0.043 \cdot q^{0.128} \cdot t^{-0.191} \quad (5)$$

回归方程 (4) 的检验结果见表 2。

另外, 拟合关系式 (5) 中热流密度和烧蚀时间的指数说明前者对质量烧蚀率的影响程度要小于后者。同样将 q 和 t 对 M 作双因素非重复试验的方差分析, 得到相同的结论。

从回归方程式 (5) 得到同一热流密度下, 随烧蚀时间的延长, 质量烧蚀率下降; 但在相同的烧蚀时间下, 随热流密度增大, 质量烧蚀率增大, 与试验结果分析的结论一致。

对回归模型的预测精度进行评价, 以拟合关系式

预测得到的质量烧蚀率 M_i 与实验得到的质量烧蚀率 M_a 作差值, 即 $\Delta M = |M_i - M_a|$, 将 ΔM 与 M_a 的商作为误差 E

$$E = \frac{|M_i - M_a|}{M_a} \times 100\%$$

一般认为, 平均误差小于 10%, 模型预测精度较高, 即模型和观察值之间的差距较低^[2]。经过计算, 回归关系式(4)的平均误差为 3.5%, 说明回归关系式(4)的预测精度较好。

将 CF/S-157PF 复合材料在其他条件下的质量烧蚀率试验结果与关系式(5)的计算值作对比, 并计算各组数据的误差, 如表 3 所示。

表 3 质量烧蚀率计算和试验结果的比较

Tab. 3 Comparison between experimental and computable results of mass loss rate

试验条件		试验结果	计算结果	误差 E
$q/\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$	t/s	$/\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$	$/\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$	$\%$
1.55	20	59	63	6.3
1.83	10	79	73	7.1
4.24	20	74	60	3.3
4.15	10	81	82	0.6
4.24	30	69	66	3.4

3 结论

(1) 通过对 CF/S-157PF 复合材料质量烧蚀率的试验结果进行回归分析, 拟合得到质量烧蚀率与热流密度和烧蚀时间的数学关系式 $M = 0.043 \cdot q^{0.128} \cdot t^{-0.191}$, 经检验该关系式可以用于质量烧蚀率的预测, 适用于氧-乙炔试验中热流密度范围 1.54 ~ 4.26 MW/m², 烧蚀时间 8 ~ 30 s 的试验条件。

(2) 经过验证, 质量烧蚀率的实际值和预测值吻合较好, 应用该关系式计算得到的质量烧蚀率可以快速、有效评价 CF/S-157PF 复合材料的烧蚀性能。

参考文献

- [1] 袁海根, 曾金芳, 杨杰, 等. 耐热抗烧蚀复合材料研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2006, 4(1): 21-25
- [2] GJB 323A-1996 烧蚀材料烧蚀试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1996
- [3] 尹健, 张红波, 熊翔, 等. 烧蚀条件对混合基体 C/C 复合材料烧蚀性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1): 26-29
- [4] 张志成. 高超声速气动热和热防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [5] 赵选民, 徐伟, 师义民, 等. 数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2002

(编辑 李洪泉)

欢迎订阅 2012 年《化工新型材料》

《化工新型材料》创刊于 1973 年, 系中国化工信息中心主办的化工科技类刊物。《化工新型材料》为中文核心期刊, 《美国化学文摘(CA)》收录期刊, 《中国化学化工文摘》来源刊物, 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊, 《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊, 《万方数据-数字化期刊群》全文收录期刊。《化工新型材料》主要报道国内外新近发展和正在开发的具有某些优异性能或特种功能的先进化工材料的研究开发、技术创新、生产制造、加工应用、市场动向及产品发展趋势。

《化工新型材料》为月刊, 大 16 开。全国各地邮局均可订阅或通过编辑部直接订阅。

邮发代号: 82-816

国际刊号: ISSN 1006-3536

国内刊号: CN 11-2357/TQ

国内定价: 13 元/期, 156 元/年

合订本: 200 元/本(2010 年之前)

邮编: 100029

地址: 北京安定门外小关街 53 号

电话: (010)64437113 64444093-843, 844

传真: (010)64437113

网址: <http://www.hgxx.org>

E-mail: hgxx@cheminfo.gov.cn

开户行: 工行北京化信支行

户名: 中国化工信息中心

帐号: 0200228219020180864