

氧化硅体系非牛顿流黏性烧蚀行为分析

姜贵庆¹ 俞继军¹ 李仲平²

(1 航天空气动力技术研究院,北京 100074)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 黏性系数对氧化硅体系材料的烧蚀速度有很大的影响,本文对非牛顿流黏性影响的范围及其量值作了数值模拟和分析。结果表明:(1)牛顿流黏度($s=1$)处于烧蚀速度的低值区域,增加黏度对降低烧蚀速度的潜力不大;(2)非牛顿流黏度($s>1$),可以增加阻力,但对降低烧蚀速度极为有限,在本文研究的热环境条件,其下降额度约为 20%~30%,此时烧蚀速度接近全蒸发的烧蚀速度;(3)非牛顿流黏度($s<1$),可以降低阻力,烧蚀速度明显增加。

关键词 烧蚀速度,黏性系数,非牛顿流

An Analysis of Ablation Behavior for Nonnewtonian Fluids for Oxy-Silicon Composites

Jiang Guiqing¹ Yu Jijun¹ Li Zhongping²

(1 Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

(2 Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract There is a severe influence of the viscosity change upon ablation recession rate for oxy-silicon composites. The numerical simulation and analysis of ablation behavior for nonnewtonian fluids are presented. The analysis results show: (1) The ablation recession rate of newtonian fluids is in lower region. (2) The resistance may be increased with viscosity augmentation ($s>1$) for nonnewtonian fluids, but the decreasing value of recession rate is very finite and the value limit is close to evaporation velocity. (3) The resistance may be decreased with viscosity abatement ($s<1$) for nonnewtonian fluids and the recession rate increases evidently.

Key words Recession rate, Viscosity, Nonnewtonian fluids

1 引言

高热流电弧加热试验表明,高黏度氧化硅材料表面具有起伏波动的特殊烧蚀现象。对二维不可压缩流动,利用非牛顿流黏度关系式和驻点流动的相似性条件,对边界层内的速度分布进行相似性求解,计算结果表明在某些非牛顿流条件下,边界层速度剖面会出现振荡现象,这个结果表明高黏度氧化硅材料的非牛顿流黏度对材料的烧蚀行为具有严重影响。对非牛顿流进行模拟的方法主要有幂律方程^[1]及四参数的 Carreau 方程等^[2]。本文应用两参数的幂律方程^[3],利用液态层模型和液态表面能量平衡方程,对非牛顿流黏性的烧蚀行为进行数值模拟和分析,得到了一些有意义的结果。

2 非牛顿流黏度的经验关系式

应用广义牛顿模型,它能表达的只是非牛顿黏度,但不含法向应力效应、依时效应和弹性效应。

对于不可压缩牛顿流,其应力张量可表示为:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, μ 为液层为牛顿流时的黏度,引进应变张量符号:

$$\dot{\gamma} = \nabla \cdot v \quad (2)$$

式中, v 为液层流动时的速度张量,对广义牛顿模型,则有:

$$\tau = - p \delta_{ij}; \quad \tau_{ij} = \mu \dot{\gamma}_{ij} \quad (3)$$

已有 $\dot{\gamma}_{ij}$ 的经验表达式有数十个,本文采用最简单的两参数的幂律方程^[3]。

收稿日期:2007-03-01;修回日期:2007-05-24

作者简介:姜贵庆,1934年出生,研究员,主要从事气动热力学与热防护的研究工作

宇航材料工艺 2007年 第5期

— 27 —

$$= 0 \quad s^{-1} \quad (4)$$

式中, μ 为黏度系数, μ_0 和 s 为表征流体的两个常数, 有时称其为物质参数。

3 非牛顿流黏度的液态层方程

根据文献 [4~5], 液态层的动量方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

式中, y 为液态层流动的法线方向, x 为液态层流动的切线方向。对牛顿流:

$$\mu = \mu(T)$$

此时烧蚀速度可由方程 (5) 和相应的连续方程得出, 对非牛顿流由公式 (4) 确定。

方程 (5) 左边项

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]^s \quad (6)$$

方程 (5) 对 y 积分, 可得:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]^s = \frac{1}{s} (\mu_w + p_x y) \quad (7)$$

式中, μ_w 为液态层表面的摩擦力, p_x 为液态层表面处的压力梯度, 根据黏度在液层内的分布性质^[4], 此时 $\mu_w = \mu_0 e^{-y/\delta}$, μ_w 为液层表面处的黏度, δ 为液态层厚度。

则 (7) 式可写成

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left[\frac{1}{s} (\mu_w + p_x y) e^{y/\delta} \right]^{1/s} \quad (8)$$

对 (8) 式积分

$$u = \int_0^y \left[\frac{1}{s} (\mu_w + p_x y) e^{y/\delta} \right]^{1/s} dy \quad (9)$$

(9) 式不能直接积分, 但考虑平板流动 ($p_x = 0$) 及在 $y = 0$ 时 $u = 0$, 则 (8) 式可直接积出:

$$u = \left[\frac{1}{s} \mu_w \right]^{1/s} e^{y/\delta} \quad (10)$$

利用连续方程

$$\frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (11)$$

对 (11) 式积分, 可得烧蚀速度的关系式

$$v_w - v_c = - \int_0^{\delta} \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (12)$$

将 (10) 式代入

$$v_c - v_w = - \frac{d}{dx} \left[\left(\frac{\mu_w}{s} \right)^{1/s} \delta^2 \right] \quad (13)$$

对驻点: $\mu_w = \mu_{wx}$, $x = 0$, $\mu_{wx} = 0$ 。则 (13) 式可写成

$$v_c - v_w = - \frac{1}{s} \left(\frac{\mu_{wx}}{s} \right)^{(1/s)-1} \delta^2 \mu_{wx} \quad (14)$$

对非驻点:

$$v_c - v_w = - \frac{1}{s} \left[\left(\frac{\mu_w}{s} \right)^{1/s} \delta^2 \right] \quad (15)$$

式中, v_c 为烧蚀速度, v_w 为气化速度 (或蒸发速度)。求解表面温度, 还需要表面能量平衡方程。

$$q_0 - T_w^4 = \rho_L v_c [\bar{C}_p (T_w - T_0) + f H_v] \quad (16)$$

式中, f 为气化系数, 其求解方法详见参考文献 [4~5], ρ_L 为材料辐射系数, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, ρ_L 为液层密度, \bar{C}_p 为比热容, T_0 为初始温度, H_v 为蒸发潜热, ρ_L 为质量引射因子, $q_0 = q_{0r} (1 - h_w/h_r)$; $q_{0r} = 1 - 0.62 \rho_L f v_c h_r / q_{0r}$, q_{0r} 为冷壁热流。

4 非牛顿流黏度对烧蚀性能影响的计算

4.1 计算模型与状态参数

平板模型, 材料为高黏度纯二氧化硅, 选取的用于计算的状态参数见表 1。

表 1 计算状态

Tab 1 Computational states

状态	q /MW·m ⁻²	V /km·s ⁻¹	H /MJ·kg ⁻¹	P_c /MPa	t /s
1	8.40	2.8	13.46	0.13	20
2	15.91	2.4	11.58	0.28	10

计算中非牛顿流的物质系数 s 分别取 0.2, 0.4, 0.6, ..., 2.0。 $s = 1$ 对应牛顿流黏度; $s > 1$ 表示黏性阻力与应变的关系中, 其应变的次方 > 1 ; $s < 1$, 其应变的次方为 < 1 。

4.2 计算结果及其分析

对相应的液态层流动方程 (14) 及表面能量方程 (15) 等进行联合求解, 图 1 给出了根据表 1 中两个计算状态得到的氧化硅体系隔热材料烧蚀速度随非牛顿流黏度物质系数 s 的变化规律; 图 2 给出了相应的表面温度随非牛顿流黏度物质系数的变化规律。

根据表 1 的计算状态, 表 2 给出了物质系数 s 对烧蚀性能 (烧蚀速度和表面温度) 影响的计算结果的具体数值。

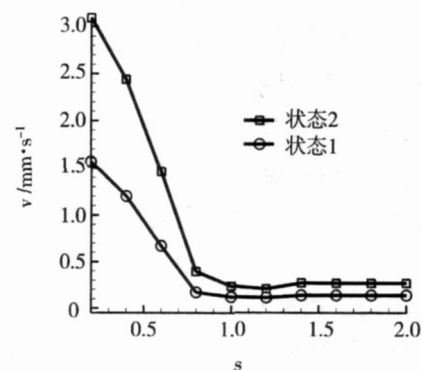


图 1 烧蚀速度与物质系数 s 的变化曲线

Fig 1 Recession rate vs coefficient s

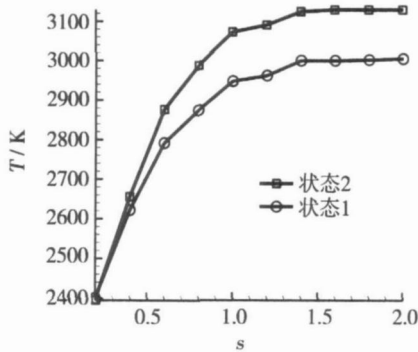


图 2 表面温度与物质系数 s 的变化曲线

Fig 2 Surface temperature vs coefficient s

表 2 物质系数 s 对烧蚀性能影响的计算结果

Tab 2 Effect of coefficient s on ablation parameters

s	状态 1		状态 2	
	$w_w / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	T_w / K	$w_w / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	T_w / K
0.2	1.564	2400	3.094	2395
0.4	1.2011	2622	2.442	2656
0.6	0.6702	2792	1.463	2877
0.8	0.1727	2875	0.3853	2988
1.0	0.1228	2948	0.2377	3073
1.2	0.1150	2962	0.2091	3091
1.4	0.1392	3000	0.2737	3125
1.6	0.1392	3000	0.2692	3130
1.8	0.1392	3000	0.2692	3130
2.0	0.1292	3000	0.2692	3130

结果表明:

(1) 牛顿流黏度 ($s = 1$) 处于烧蚀速度的低值区域, 增加黏度对降低烧蚀速度的潜力不大。

(2) 非牛顿流黏度 ($s > 1$), 可以增加阻力, 但对降低烧蚀速度极为有限, 在本文研究的热环境条件, 其下降额度约为 20% ~ 30%, 此时烧蚀速度接近全

蒸发的烧蚀速度。

(3) 非牛顿流黏度 ($s < 1$) 可以降低阻力, 其结果是液态层流失严重, 烧蚀速度出现明显的增加。

5 结论

(1) 牛顿流黏度 ($s = 1$) 处于烧蚀速度的低值区域, 增加黏度对降低烧蚀速度的潜力不大。提高黏度对改善烧蚀速度有极限, 其极限值是二氧化硅的全蒸发状态。

(2) 非牛顿流黏度 ($s > 1$), 可以增加阻力, 但对降低烧蚀速度极为有限, 在本文研究的热环境条件下, 其下降额度约为 20% ~ 30%, 此时烧蚀速度接近全蒸发的烧蚀速度。

(3) 非牛顿流黏度 ($s < 1$) 可以降低阻力, 其结果是液态层流失严重, 烧蚀速度出现明显的增加。

参考文献

- 1 Chamkha A J, Al-Humoud J M. Mixed convection heat and mass transfer of non-newtonian fluids from a permeable surface embedded in a porous medium. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2007; 17 (2): 195 ~ 212
- 2 Radman M, Blackburn H M. Direct numerical simulation of turbulent non-newtonian flow using a special element method. *Applied Mathematical Modeling*, 2006; 30: 1 229 ~ 1 248
- 3 博德 R B 等. 传递现象. 北京: 化学工业出版社, 2004: 218 ~ 219
- 4 姜贵庆, 刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护. 北京: 国防工业出版社, 2003: 56 ~ 66
- 5 黄志澄等. 航天空气动力学. 北京: 宇航出版社, 1994: 365 ~ 409

(编辑 李洪泉)

欢迎订阅 2008年《化学推进剂与高分子材料》

《化学推进剂与高分子材料》是由黎明化工研究院主办, 中国聚氨酯工业协会、全国化学推进剂信息站协办的国内外公开发行的化工科技期刊, 是《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, 《中国核心期刊(遴选)数据库》来源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊。

本刊主要报道聚氨酯、胶黏剂、涂料、工程塑料等高分子材料, 化学推进剂原材料以及精细化工等相应专业研究论文、专论与综述、生产实践经验总结、新产品和新知识介绍、国内外科技信息及市场动态等。本刊内容新颖, 信息量大, 印刷质量好, 在全国化工系统中有一定影响。在 1993, 1996, 2002 年全国石化系统化工期刊评比中连获优秀期刊奖。2006 年荣获第六届全国石油和化工行业优秀期刊(专业技术类)二等奖。

本刊为双月刊。国内刊号为 CN 41-1354/TQ, 国际刊号为 ISSN 1672-2191, 广告经营许可证号为 4103004000006。采用国际标准大 16 开, 由专业印刷厂精心承作。彩色封面印刷, 设计装潢精美, 正文内容及插页广告均用铜版纸。内地: 每期定价 10 元, 全年定价 60 元; 港澳台: 50 美元/年(400 港元/年); 国外: 60 美元/年。皆含邮资。本刊自办发行, 同时又参加了全国非邮发报刊联合发行等, 以方便单位和个人订阅。竭诚欢迎订阅者随时来电来函索取订单, 也可直接寄款编辑部订阅。

内容丰富 设计精良 印刷精美 发行广泛

真诚欢迎您订阅、投稿以及发布广告!

本刊地址: 河南省洛阳市王城大道 69 号 (471000)

联系人: 徐梅青 王喜荣

联系电话: 0379-62301694 62303751

户名: 黎明化工研究院

传真: 0379-62307056

开户行: 工行九都支行营业部

E-mail: lninfo2000@yahoo.com.cn

账号: 1705 0240 1920 0032 815