

碳/酚醛材料的粒子侵蚀

高立新 蔡 峨

(北京航空航天大学)

摘 要: 引用均质材料的冲蚀疲劳理论, 研究了碳/酚醛材料应用在固体火箭发动机喉衬情况下的侵蚀特性; 分别对无碳化层和有碳化层两种状态进行了分析和计算。综合热化学烧蚀计算与实验对比, 得到粒子冲蚀的定性及定量结果。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 喷管衬套, 纤维增强复合材料, 冲蚀

PARTICLE IMPINGEMENT OF CARBON/ PHENOLIC MATERIALS

Gao Lixin Cai E

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: In this paper theorems on homogeneous materials subjected to impingements and fatigue was quoted. Erosive behavior of C/phenolic materials applied to solid rocket nozzle throats was investigated. Analysis and calculation on a single substrate and substrate covered by a changing char layer was conducted respectively. Sum up the thermo-chemical erosion calculation and contrast with the test results, the qualitative and quantitative results of particle impingements were gained.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Nozzle liner, Fiber reinforced composite, Impingement corrosion

符 号 表

p 压强 (N/m^2)

ρ 密度 (kg/m^3)

n 单位面积粒子冲击次数 (个/m^2)

t 时间 (s)

c 音速 (m/s)	W 侵蚀质量 (kg/m^2)
v 粒子速度 (m/s)	$\dot{m}$ 质量侵蚀率 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)
V_m 酚醛树脂体积分数	α 单个粒子侵蚀率 ($\text{kg}/\text{个}$)
V_f 碳纤维体积分数	d 粒子直径 (mm)
θ 粒子冲击角度	h 碳化层厚度 (mm)
E 弹性模量 (N/m^2)	F_p 粒子流量 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)
G 剪切模量 (N/m^2)	N_u 粒子流量 ($\text{个}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)
ν 泊松比	r_p 粒子侵蚀率 (mm/s)
σ 应力 (N/m^2)	r_{ch} 化学烧蚀率 (计算值) (mm/s)
σ_1 疲劳极限 (N/m^2)	r_{ex} 实验烧蚀率 (mm/s)
σ_u 极限抗张强度 (N/m^2)	下标
$\bar{\sigma}_0$ 液滴与碳化层交界面处平均应力 (N/m^2)	L 液态
Z 材料阻抗 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	S 固态 (碳/酚醛材料)
S 定义参数	m 基体
S_c 定义参数	f 纤维
$\bar{K}$ 应力波在碳化层内的反射次数 (冲击期间内)	C 碳化层
K_c 应力波在碳化层内的最大反射次数	i 潜伏期结束
	SC 碳化层-基体交界
	LC 液体-碳化层交界

1 引 言

碳/酚醛材料用于固体火箭发动机喷管,受到高温高速燃气的作用。随着材料表面温度的升高,酚醛树脂基体解聚、气化,碳纤维增强材料开始裸露出来,形成碳化层。随着过程的继续,碳化层的厚度不断增加。

现代固体火箭发动机,采用含铝高能推进剂。燃气中包含熔融铝滴及大量 Al_2O_3 凝相产物。喷管内壁特别是喉部表面受高温高速两相流的冲蚀作用。

目前复合材料喷管的气动热化学烧蚀已经研究得比较多,而关于凝相粒子的冲蚀研究尚不成熟。本文参考了 Springer 等人提出的材料受高速液滴冲蚀的疲劳破坏理论^[1],建立了碳/酚醛材料的冲蚀破坏模型,进行了分析及计算;综合气动热化学烧蚀计算结果,与实测烧蚀率对比更加贴近。也证实了热化学烧蚀占绝对主导的论断。

2 冲蚀破坏机理

纤维增强非金属复合材料受高速气液两相流的冲蚀作用,很类似于连续作用的弯曲或扭转的交变载荷;纤维材料极易在这种载荷下破碎而被气流冲蚀掉。实验表明,材料疲劳破坏具有某个潜伏期 t_f ,在 t_f 时间之内材料没有剥蚀,超过 t_f 以后,材料的侵蚀量 W 随时间 t 近似呈线性增加;超过某个时间 t_f 以后, W 随 t 的变化比较复杂,如图 1 所示。一般情况不会达到 t_f 值,所以只考虑 t_f 以前的情况,并简化为直线关系如图 2。

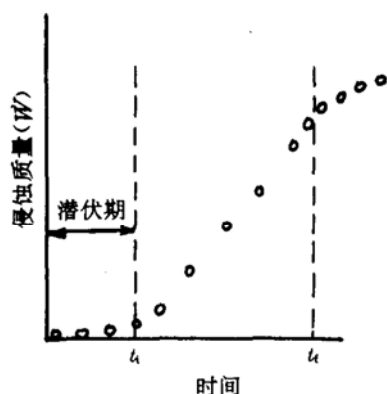


图1 侵蚀量试验结果

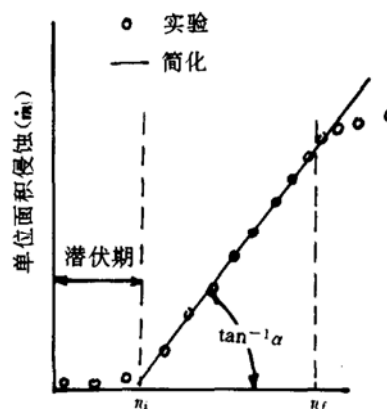


图2 近似简化

这样, 如果用 $\dot{m}$ 表示质量侵蚀率, 则有:

$$\dot{m} = 0 \quad 0 < n \leq n_i \quad (1)$$

$$\dot{m} = \alpha N_u \quad n_i < n < n_f \quad (2)$$

所以只要求得 n_i 和 α 、知道了 N_u , 便可以求得侵蚀率 $\dot{m}$; 从而可求出线侵蚀率 r_p :

$$r_p = \dot{m} / \rho$$

3 无碳化层情况的计算

把液滴冲击的压强近似地用经典水锤力方程表示⁽¹⁾:

$$p = \frac{\rho_L C_L v \cos \theta}{\rho_L C_L / \rho_S C_S + 1} \quad (4)$$

其中

$$\rho_S = \rho_f V_f + \rho_m V_m; \quad C_S = \left(\frac{E_S}{\rho_S} \right)^{1/2} \quad (5)$$

每个液滴对材料表面的冲击力为:

$$F = p \frac{\pi d^2}{4} \quad (6)$$

d 为液滴直径 (图3)。

假设材料表面结构均匀, 各向同性; 碳纤维平行材料表面, 酚醛基体和纤维之间紧密粘结; 单个粒子的冲击效果不受下一个粒子的影响。则材料表面上某点 B (图4), 距 B 为 r 距离处任一个单个液滴 (点力) 造成 B 点的应力为⁽²⁾:

$$\sigma(r) = F(1 - 2\nu_S) / 2\pi r^2 \quad (7)$$

在 dr 环带之内的所有液滴造成 B 点的应力都在 σ 和 $\sigma + d\sigma$ 之间。潜伏期内这个环带作用的冲击应力循环次数为:

$$f(r) = n_i 2\pi r dr \quad (8)$$

$$\frac{\pi d^2}{4} n_i p (1 - 2\nu_s) \frac{\sigma_u^{b-1} - \sigma_1^{b-1}}{2(b-1)\sigma_u^b} = a_1 \quad (19)$$

引入定义:

$$S \equiv \frac{2\sigma_u(b-1)}{(1-2\nu_s)\left[1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_u}\right)^{b-1}\right]} \cong \frac{2\sigma_u(b-1)}{1-2\nu_s} \quad (20)$$

$$n_i^* \equiv n_i \frac{\pi d^2}{4}$$

n_i^* 可视为潜伏期内单个液滴面积上受冲击的次数。则方程 (19) 变为:

$$n_i^* = a_1 \frac{S}{p} \quad (21)$$

参量 S 表征受冲蚀材料的强度特性。单个液滴面积受冲蚀导致破坏的次数 n_i^* 正比于材料强度 S 和液滴冲击强度 p 之比, 这是合理的。但是 n_i^* 和 S/p 之间一般不可能是直线关系。同时, 为了扩大这个关系式的应用范围, 表为如下形式:

$$n_i^* = a_1 \left(\frac{S}{p} \right)^{a_2} \quad (22)$$

a_1, a_2 根据实验确定。

4 有碳化层的分析

前面已经谈到, 碳/酚醛材料烧蚀的特点就是形成碳化层, 并且逐渐变厚。碳层表面受粒子冲蚀, 应力通过碳层在基体界面上由于材料结构的变化而产生应力波 (图 6)。

开始冲击时, $\sigma_1 = p$; 碳化层中的应力波在交界面处一部分传到材料内部, 另一部分在碳化层中反回, 因此形成一系列的回波。其大小为 $\sigma_{2k}^{[3]}$ 。

$$\frac{\sigma_{2k}}{\sigma_1} = \frac{1 - \psi_{sc}}{1 - \psi_{sc}\psi_{lc}} [1 - (\psi_{sc}\psi_{lc})^k] \quad (23)$$

经过时间间隔 $t = 2h/C_c$, 回波到达碳化层表面; 而这时表面上又有新的液滴冲击, 因而又产生了新的应力波; 其大小为 σ_{2k-1} :

$$\frac{\sigma_{2k-1}}{\sigma_1} = \frac{\sigma_{2k}}{\sigma_1} - \psi_{sc}(\psi_{sc} \cdot \psi_{lc})_{k-1} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

$$\psi_{sc} = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c}; \quad \psi_{lc} = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c} \quad (25)$$

材料阻抗 $Z = \rho \cdot C$ 。

经过一段时间以后 (即经过多次反射, $k \rightarrow \infty$), 则碳层表面或与本体材料界面处, 应力都趋于某定值。

$$\sigma_{\infty} = \sigma_1 \lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_{2k} = \sigma_1 \frac{1 + \psi_{sc}}{1 - \psi_{sc} \cdot \psi_{lc}} = \sigma_1 \frac{1 + Z_l/Z_c}{1 + Z_l/Z_s} \quad (26)$$

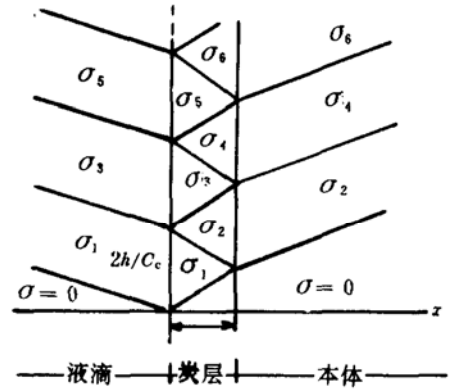


图6 应力波在碳化层中的传播

这样, σ_{2k} 可以改写为:

$$\frac{\sigma_{2k}}{\sigma_1} = \frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \cdot (\psi_{sc} \cdot \psi_{lc})^{k-1} \quad (27)$$

方程 (27) 可近似为:

$$\frac{\sigma_{2k}}{\sigma_1} = \frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \exp\left(-\frac{k-1}{k_e}\right) \quad (28)$$

实际是用指数曲线代替了阶梯变化。 K_e 表示应力达到 63.3% 时的反射次数^[3]。

方程 (28) 和 (27) 的近似, 表示下面关系成立:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) (\psi_{sc} \cdot \psi_{lc})^{k-1} \right] \\ &= \int_1^{\infty} \left[\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_\infty}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \exp\left(-\frac{k-1}{k_e}\right) \right] dk \end{aligned} \quad (29)$$

对上式求和和积分, 最后可得:

$$k_e = \frac{1}{1 - \psi_{sc}\psi_{lc}} = \frac{1 + Z_L/Z_c}{2} \cdot \frac{1 + Z_c/Z_s}{1 + Z_L/Z_s} \quad (30)$$

液滴冲击压强作用时间 t_L 近似取为:

$$t_L = \frac{2d}{C_L} \quad (31)$$

则 t_L 时间内, 应力波反射次数:

$$k_L = t_L \frac{C_c}{2h} = \frac{C_c}{C_L} \cdot \frac{d}{h} \quad (32)$$

$$\text{比值} \quad \gamma = \frac{k_L}{k_e} = \frac{C_c}{C_L} \frac{d}{h} \left(\frac{1 + Z_L/Z_s}{1 + Z_c/Z_s} \right) \cdot \frac{2}{1 + Z_L/Z_c} \quad (33)$$

用 $\bar{k}$ 表示碳化层中应力波反射的平均次数。则:

$$\bar{k} = k_e \left[1 - \exp\left(-\frac{k_L}{k_e}\right) \right] = k_e [1 - \exp(-\gamma)] \quad (34)$$

碳化层表面上的平均应力为:

$$\bar{\sigma}^0 = \frac{1}{k_L} \sum_{k=1}^{k_L} \sigma_{2k-1} \quad (35)$$

将式 (23)、(24)、(26) 代入上式:

$$\frac{\bar{\sigma}^0}{\sigma_1} = \frac{1 + \psi_{sc}}{1 - \psi_{sc}\psi_{lc}} \left[1 - \psi_{sc} \frac{1 + \psi_{lc}}{1 + \psi_{sc}} \cdot \frac{1 - \exp(-\gamma)}{\gamma} \right] \quad (36)$$

则平均冲击力 $\bar{F} = \bar{\sigma} \frac{\pi d^2}{4}$ (37)

由于应力波在碳化层中的反射和渗透, 碳化层中的应力呈波动状态, 如图 7 示。

采用“等价动应力”概念

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a \sigma_m}{\sigma_u - \sigma_m} = \sigma'_e + \sigma''_e \quad (38)$$

其中 σ_m 为应力平均值; σ_a 为振幅。

$$\sigma'_e = \frac{\sigma |\psi_{sc}| \sigma_u}{\sigma_u - \sigma}, \quad \sigma''_e = \frac{(\sigma/2) \sigma_u}{\sigma_u - (\sigma/2)} \quad (39)$$

因此, 相应的 Miner 准则为:

$$\sum_i \left(\frac{f_i}{N'_i} + \frac{\bar{k} f_i}{N''_i} \right) = a_1 \quad (40)$$

写成积分形式, 取 r 为 $0 \sim \infty$ 。

$$\int_0^\infty \frac{n_i 2\pi r}{N'_i} dr + \int_0^\infty \frac{\bar{k} n_i 2\pi r}{N''_i} dr = a_1 \quad (41)$$

由疲劳曲线, $N = (\sigma_u / \sigma_e)^b$; 或:

$$b = \frac{b_2}{\log(\sigma_{uc} / \sigma_{1c})} \quad (42)$$

考虑到碳化层, (12) 式变为:

$$r dr = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\bar{F}(1 - 2\gamma_c)}{2\sigma^2} \cdot d\sigma \quad (43)$$

将 (42)、(43) 代入 (41) 式, 积分得:

$$\frac{\pi d^2}{4} n_i \bar{\sigma}^0 (1 - 2\gamma_c) \frac{\sigma_{uc}^{b-1} - \sigma_{1c}^{b-1}}{4(b-1)\sigma_{uc}^b} (1 + 2\bar{k} |\psi_{sc}|) = a_1 \quad (44)$$

令

$$S = \frac{4\sigma_{uc}(b-1)}{(1-2\gamma_c) \left[1 - \left(\frac{\sigma_{1c}}{\sigma_{uc}} \right)^{b-1} \right]} \quad (45)$$

以及

$$n_i^* = n_i \frac{\pi d^2}{4} \quad (46)$$

类似于无碳化层时的处理, 最后得到:

$$n_i^* = a_1 \left[\frac{S}{\bar{\sigma}^0} \cdot \frac{1}{1 + 2\bar{k} |\psi_{sc}|} \right]^{a_2} \quad (47)$$

根据文献 [3] 实验拟合数据, $a_1 = 7.1 \times 10^{-6}$; $a_2 = 5.7$ 。

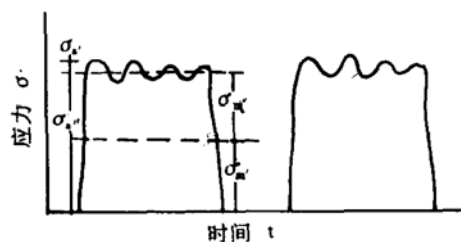


图 7 碳层表面应力随时间的变化

5 计算侵蚀率 r_p

文献〔3〕根据大量试验结果, 得出 α^* 和 $1/n_i^*$ 的关系:

$$\alpha^* = 0.023 \left(\frac{1}{n_i^*} \right)^{0.7} \quad (48)$$

其中 α^* 为单个液滴冲蚀率 α 的无因次形式。

$$\alpha^* \equiv \frac{\alpha}{\pi \rho_s d^3 / 4} \quad (49)$$

这样, 利用 (47) 式就可以计算 n_i 和 α 值。如果粒子流量为 F_p , 单个粒子质量为 m_p ; 则单位时间内单位面积流过的粒子数为:

$$N_u = F_p / m_p \quad (50)$$

$$\text{疲劳潜伏期} \quad t_i = n_i / N_u \quad (51)$$

因此, 利用式 (2) 和 (4) 即可计算质量侵蚀率和线侵蚀率。

6 计算与实验结果对比及结论

利用有关原始数据, 首先进行碳化层厚度计算, 然后利用上面关系计算潜伏期 t_i 以及粒子侵蚀率。将计算结果绘制曲线。图 8 表示单独考虑粒子侵蚀和化学烧蚀的计算结果, 与实验曲线的对比。

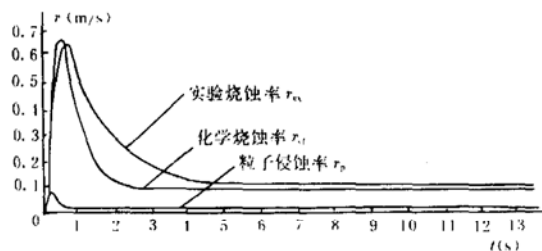


图 8 实验及计算曲线

通过对比可以看出:

(1) 粒子侵蚀率比起化学烧蚀率, 相差约一个量级; 随着碳化层的生成, 粒子侵蚀确可忽略不计。

(2) 考虑化学烧蚀和粒子侵蚀的计算结果叠加, 和实测烧蚀率更加贴近。

参 考 文 献

- 〔1〕 Springer G S et al. A Model for Rain Erosion of Homogeneous Materials. American Society for Testing and Materials, 1974
- 〔2〕 铁摩辛柯著, 徐芝纶译. 弹性理论. 高等教育出版社, 1990
- 〔3〕 Springer G S et al. Analysis of Rain Erosion of Coated Materials. J. Composite Materials, 1974. 7