

粒子云侵蚀问题实验研究中 动能通量模拟的意义

刘大有 吴承康
(中国科学院力学研究所)

摘要 本文首先将粒子云侵蚀条件下的驻点表面后退分解为无粒子烧蚀部分、粒子云引起的烧蚀增量部分和粒子撞击物面引起的直接侵蚀部分。然后研究了表面能量平衡关系,给出了粒子云引起的烧蚀增量表达式。最后分三类讨论粒子与飞行器的碰撞:(1)完全弹性碰撞(不符合实际);(2)完全非弹性碰撞;(3)部分弹性碰撞。对于后两种碰撞,本文分析了动能通量模拟适用的条件。

关键词 粒子云, 侵蚀, 烧蚀, 动能通量模拟。

一、引言

飞行器再入时,由于天气粒子(雨、雪和冰)或其它尘埃物质的侵蚀,使防热层的后退率大大地超过清洁空气再入环境下的烧蚀后退率。因此,粒子云侵蚀问题是全天候飞行器研制中的一个重要课题。

粒子云侵蚀问题,一般都同烧蚀问题耦合,这样使本来就十分复杂的烧蚀问题又增加了更困难的内容。

粒子云侵蚀问题研究,对地面模拟设备的参数要求很高,几乎不可能完全满足或近似满足。因此,人们期望能找出一个或少数几个主要模拟参数,以期求得粒子云侵蚀的主要规律。

对于粒子参数,很多人都取动能通量作为主要模拟参数。尽管采取这种做法的科研报告和论文很多^[1,2],但未见有人对这种做法的合理性作一较系统的论述。本文将讨论在粒子云侵蚀研究中,粒子动能通量模拟的意义。

二、防热层烧蚀/侵蚀量的分解

粒子云侵蚀包括以下几个主要环节:

1. 粒子同物面碰撞引起的直接侵蚀作用;

本文于1989年4月14日收到,10月5日收到修改稿。

2. 来流粒子、从物面反弹的粒子和防热层碎片对流场的干扰, 粒子侵蚀弹坑产生的表面粗糙度, 这些都会使表面热流增加, 烧蚀也相应地增加(式(1)中的 $\Delta \dot{m}_{a1}$);

3. 有粒子和防热层碎片参与的表面能量平衡, 出现了新的热流项, 以及相应的烧蚀增量(式(1)中的 $\Delta \dot{m}_{a2}$)。

粒子云侵蚀的确切含义, 似乎不很统一。有时仅指粒子云的机械剥蚀。有时指粒子撞击物面的直接侵蚀(包括前者和粒子动能转换的热作用)。有时则包括直接侵蚀作用, 与气动加热增量相应的烧蚀增量, 以及烧蚀/侵蚀的各种耦合作用的总和。为确切起见, 本文用三个不同的术语加以区分: 机械剥蚀、直接侵蚀和总侵蚀。

设 \dot{m} 为粒子云环境中防热层的烧蚀和侵蚀的总速率, \dot{m}_e 为粒子的直接侵蚀率, \dot{m}_a 为粒子云环境中的烧蚀率, \dot{m}_{a0} 为无粒子的烧蚀率, $\Delta \dot{m}_a (\equiv \dot{m}_a - \dot{m}_{a0})$ 为粒子云引起的烧蚀增量, $\Delta \dot{m} (\equiv \dot{m}_e + \Delta \dot{m}_a)$ 为粒子云的总侵蚀率。 $\Delta \dot{m}_a$ 还可分解为 $\Delta \dot{m}_{a1}$ 和 $\Delta \dot{m}_{a2}$, 这样 $\Delta \dot{m}$ 就由 \dot{m}_e 、 $\Delta \dot{m}_{a1}$ 和 $\Delta \dot{m}_{a2}$ 组成, 它们分别对应于本节开始提到的三个环节。由这些定义得

$$\dot{m} = \dot{m}_e + \dot{m}_a = \dot{m}_e + \Delta \dot{m}_a + \dot{m}_{a0} = \dot{m}_e + \Delta \dot{m}_{a1} + \Delta \dot{m}_{a2} + \dot{m}_{a0} = \Delta \dot{m} + \dot{m}_{a0} \quad (1)$$

设 \dot{q}_a 、 \dot{q}_{a0} 和 $\Delta \dot{q}_a$ 分别为粒子云环境中的气动加热的表面热流、无粒子状态的热流和粒子云引起的热流增量,

$$\Delta \dot{q}_a = \dot{q}_a - \dot{q}_{a0}$$

这三个热流分别与 $(\dot{m}_{a0} + \Delta \dot{m}_{a1})$ 、 \dot{m}_{a0} 和 $\Delta \dot{m}_{a1}$ 对应。

“粒子云侵蚀问题可用动能通量模拟”, 这有以下三种可能的含义: (1) $\Delta \dot{m}$ 可表示为

$$\Delta \dot{m} = f\left(\frac{1}{2} n_p m_p u_p^3\right) \quad (2)$$

而不分别依赖于粒子的数密度 n_p 、质量 m_p 和速度 u_p 等粒子参数, 而且函数 f 是普适的; (2) 对于一定的防热材料, 函数 f 是普适的; (3) 式(2) 只对一定的防热材料和一定的粒子种类成立, 不同的粒子或防热材料, 函数 f 是不同的。

三、粒子云侵蚀条件下的表面能量平衡

为简单起见, 下面以氧化、升华型烧蚀材料为例进行讨论。其基本思路也适用于有熔融液态层的材料。

对于清洁空气中的烧蚀, 有如下的能量平衡关系和烧蚀率表达式^[3] (假设防热层是一维半无限的物体, 无穷远处的温度为常数 T_∞)

$$\dot{q}_{a0} + \dot{m}_{a0} h_s = \dot{m}_{a0} h_g + \dot{q}_{r0} + \dot{q}_{r0} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{a0} = (\dot{q}_{a0} - \dot{q}_{r0}) / (h_g - c_s T_\infty) \quad (4)$$

其中 \dot{q} 是热流, h 是焓, c 是比热。下标 g 和 s 分别指气体和防热材料的参数。下标 0 指无粒子状态。 \dot{q}_r 是辐射热流。当采用一维半无限假设时, $\dot{q}_{r0} \approx \dot{m}_{a0} (h_s - c_s T_\infty)$ 。

在粒子云侵蚀条件下, 表面能量平衡关系、粒子侵蚀引起的烧蚀增量 $\Delta \dot{m}_a$ 和由表面流入固相的热流 \dot{q}_r 可分别表示为(设 $\dot{q}_r \approx \dot{q}_{r0}$)。

$$\dot{q}_a + \dot{m}_a h_s + \dot{q}_p = \dot{m}_a h_a + \dot{q}_s + \dot{q}_r + \dot{m}_e \left(h'_s + \frac{1}{2} u_s'^2 - h_s \right) \quad (5)$$

$$\Delta \dot{m}_a = \Delta \dot{m}_{a1} + \Delta \dot{m}_{a2} = (\Delta \dot{q}_e + Q) / (h_a - c_s T_w) \quad (6)$$

$$\dot{q}_s = (\dot{m}_a + \dot{m}_e) (h_s - c_s T_w) \quad (7)$$

其中

$$Q = \dot{q}_p - \dot{m}_e \left(h'_s + \frac{1}{2} u_s'^2 - c_s T_w \right) \quad (8)$$

$$\dot{q}_p = \dot{m}_p \left(h_p + \frac{1}{2} u_p^2 - h'_p - \frac{1}{2} u_p'^2 \right) \quad (9)$$

$$\dot{m}_p = n_p m_p u_p \quad (10)$$

\dot{m}_p 、 u_p 和 h_p 分别是到达物面时的粒子质量通量、速度和焓。角标 ' 表示从物面离开时的(反弹)粒子或防热层碎片的参数。 Q 是粒子直接侵蚀作用对表面能量平衡的贡献, 包括粒子和防热层碎片的贡献。

四、粒子与物面的碰撞

本文主要研究驻点区, 因此可认为碰撞都是正面碰撞。

1. 完全弹性碰撞

对于完全弹性的碰撞, 在碰撞过程中没有机械能转换为热的过程, 只可能在两个碰撞体之间发生机械能的交换。两个碰撞体的动能之和, 在碰撞前与碰撞后保持不变。由于碰撞时间很短, 两个碰撞体之间也没有显著的热交换。因此, 若是完全弹性碰撞, 粒子对表面的热状态和烧蚀过程不会有明显的影响。但实际上, 不论飞行试验或地面模拟试验, 都看到粒子云条件下防热层后退明显加快。这说明碰撞不是完全弹性的。

2. 完全非弹性碰撞

完全非弹性碰撞的结果, 两个碰撞体的相对运动动能完全转换为热, 粒子完全不反弹, 也不会产生碎片。在此情况下, 粒子撞击引起的直接侵蚀也完全是热作用的结果。这时可取

$$u_s' = 0, h'_s = h_a, u_p' = 0, h'_p = \varphi(p, T_w) \quad (11)$$

其中 φ 是粒子物质的状态函数, 是压强为 p 、温度等于壁温 T_w 条件下的焓。由式(6)、(8)、(9)和(11)得到

$$\Delta \dot{m} = (\Delta \dot{q}_a + \dot{q}_p) / (h_a - c_s T_w) \quad (12)$$

$$\dot{q}_p = \dot{m}_p \left\{ \frac{1}{2} u_p^2 - [\varphi(p, T_w) - h_p] \right\} \quad (13)$$

对于完全非弹性碰撞模型, 没有必要区分直接侵蚀量 \dot{m}_e 和烧蚀增量 $\Delta \dot{m}_a$, 因为在此情况下, 这两者都是热作用的结果。此时, 单由表面能量平衡关系就能求出这两者之和 $\Delta \dot{m}_a$ 。

若同时满足下述两点, 则完全非弹性碰撞模型遵循动能通量准则, 否则该准则不适用

$$(1) \Delta \dot{q}_p \text{ 可表示为 } \Delta \dot{q}_p = f_1 \left(\frac{1}{2} \dot{m}_p u_p^2 \right) \text{ 或 } \Delta \dot{q}_p \ll \frac{1}{2} \dot{m}_p u_p^2 ;$$

$$(2) \dot{m}_p [\varphi(p, T_w) - h_p] \ll \frac{1}{2} \dot{m}_p u_p^2 .$$

对于天气粒子,当壁温 T_w 很高时, $[\varphi(p, T_w) - h_p]$ 很大,甚至可能超过 $1/2 \dot{m}_p u_p^2$ 。因此,至少在飞行条件下,完全非弹性碰撞模型不遵循动能通量模拟准则。

按照完全非弹性碰撞模型分析,天气粒子对防热层的侵蚀作用不会很大。然而根据美国飞行结果和弹道靶实验结果看,天气粒子有很显著的侵蚀效应。这似乎说明,粒子云侵蚀问题中,完全非弹性碰撞模型不合理。

3. 部分弹性的碰撞

对于这种碰撞模型,分析要复杂得多。此时,因有粒子反弹和防热层碎片飞出,总侵蚀量 $\Delta \dot{m}$ 不能完全由表面能量平衡确定。一般须先求出直接侵蚀量 \dot{m}_e 。再由 $\Delta \dot{q}_e$ 和 \dot{q}_p , 利用式(6)求出烧蚀增量 $\Delta \dot{m}_a$ 。

一般说来,防热层碎片带走的能量 $(h'_s + 1/2 u_s'^2)$ 远小于烧蚀产物的焓 h_o , 反弹粒子的能量 $(h'_p + 1/2 u_p'^2)$ 也小于非弹性碰撞情况下粒子带走的能量 $\varphi(p, T_w)$ 。所以,伴有机械剥蚀作用的部分弹性碰撞,对防热层有更大的侵蚀作用。同粒子侵蚀过程相联系的粒子-物面碰撞,多数属于这一类。

粒子云侵蚀问题主要包括以下三部分:(1) 确定粒子撞击引起的直接侵蚀 \dot{m}_e ; (2) 确定粒子云引起的气动加热增量 $\Delta \dot{q}_e$, 以求得 $\Delta \dot{m}_{a1}$; (3) 由表面能量平衡关系确定 Q , 以求得 $\Delta \dot{m}_{a2}$ 。

对于一定的流动条件,通过分析,可以确定这三个环节中哪个或哪几个环节是主要的。对于每个主要环节,若都满足或近似满足动能通量准则,则模拟动能通量基本上能反映粒子的总侵蚀效应。反之,只模拟动能通量是不够的。

关于粒子直接侵蚀作用的研究,目前主要还都限于单粒子的侵蚀。Wolf^[4] 对在三个设备(分属 SAI、ETI 和 AVCO)上进行的 50 多次单粒子撞击石墨材料的试验结果进行分析,得出单粒子的侵蚀比 G_1 为

$$G_1 \equiv m_e / m_p \propto u_p^{1.72} \quad (14)$$

研究金属材料的学者对粒子撞击金属材料作了大量计算,结果可归纳为^[4,5]

$$G_1 \propto \rho_p^{0.61} u_p^{1.73} \quad \text{和} \quad G_1 \propto \rho_p u_p^2 \quad (15)$$

这些都说明粒子侵蚀量正比于或近似正比于粒子的动能 $1/2 m_p u_p^2$ 。除此以外,还对粒子的密度 ρ_p 有一定的依赖性: 0.61 次幂或 1.0 次幂。

由于直接侵蚀的非线性效应,几个粒子连续撞击的侵蚀效果不等于每个粒子单独作用的侵蚀率果的叠加。可引入放大因子 $\beta \equiv G/G_1$, 反映这种多粒子耦合效应,其中 G 是粒子云条件下的侵蚀比。分析表明, β 是“记忆参数” \dot{m}_e / \dot{m}_a 的函数^[6]。根据定义, $G \equiv \dot{m}_e / \dot{m}_p$, 因此 $G/G_1 = f(\dot{m}_e / \dot{m}_a, G/\dot{m}_a)$ 。若单粒子侵蚀量 $m_p G_1$ 正比于粒子动能 $1/2 m_p u_p^2$, 则利用上式可得出: 粒子云条件下的侵蚀通量 $\dot{m}_p G$ 是粒子动能通量的函数

$$\dot{m}_p G = \psi \left(\frac{1}{2} \dot{m}_p u_p^2, \dot{m}_a \right) \quad (16)$$

但是, $\dot{m}_p G$ 还依赖于烧蚀速率 \dot{m}_a 。

实际上, $G_s \propto 1/2 u_p^2$ 只是近似成立, 式(16)也只可能是近似的。由石墨端头在弹道靶中的实验得出, $G \propto u_p^{2.31-2.71}$ 。

根据目前尚不丰富的试验结果, 可以粗略地认为, 关于粒子的直接侵蚀作用, 可近似地用动能通量模拟。但不同的防热材料有不同的规律。

关于粒子云条件下气动加热增量 $\Delta \dot{q}_0$ 的研究, 已有很多论文。一般认为, 气动加热增量主要是由粒子干扰流场、加大了气流的湍流度, 以及粒子撞击表面、加大了表面粗糙度引起的。Hove 等^[1]和其他许多作者的研究表明, 粒子引起的湍流度增量的平方, 正比于粒子动能通量, 反比于气体的动能通量, 比例系数与材料的适应系数 f 有关。关于粒子环境中的表面相对粗糙度(以头部半径 R_b 为特征长度) r/R_b , 当侵蚀远大于烧蚀时, 基本上正比于相对粒径 d_p/R_b , 比例系数依赖于粒子动能通量、烧蚀速度和防热材料的性质^[6]。

此外, 根据 Hove 等^[8]的分析, 对于典型的飞行条件, 同直接侵蚀作用相比, 热增量效应较小。

关于粒子对表面能量平衡的影响 Q , 需分两种情况讨论: (1) 对于天气粒子, 由于它在高温下汽化, $[\varphi(p, T_w) - h_p]$ 这一项很大, 致使 Q 较小。因此, 此时 Q 是否可用动能通量模拟不很重要。(2) 对于氧化物或石墨粒子, Q 中的主要项就是粒子的动能通量 $1/2 \dot{m}_p u_p^2$, 因此能用动能通量模拟。尽管天气粒子和氧化物粒子, 都近似符合动能通量模拟准则, 但是它们依赖于动能通量的函数形式不同, 除非同直接侵蚀作用相比, Q 这一项在两种情况下都是小量。

五、结 论

1. 粒子云的总侵蚀率 $\Delta \dot{m}$, 由粒子的直接侵蚀 \dot{m}_p 和粒子云引起的烧蚀增量 $\Delta \dot{m}_a$ 所组成(见式(1))。

2. 由表面能量平衡关系得出, $\Delta \dot{m}_a \approx \Delta \dot{q}_0 / h_a + Q / h_a$ 。

3. 若粒子与物面的碰撞是完全非弹性的, 则当 $\Delta \dot{q}_0$ 可表示为 $f_1 (1/2 \dot{m}_p u_p^2)$ 或者 $\Delta \dot{q}_0 \ll 1/2 \dot{m}_p u_p^2$, 又有 $\dot{q}_0 \approx 1/2 \dot{m}_p u_p^2$ 时, 动能通量准则适用于总侵蚀率 $\Delta \dot{m}$ 的研究。

4. 粒子与物面的碰撞, 多数是部分弹性的。此时 \dot{m}_a 大体上可用动能通量模拟, 而且天气粒子与氧化物粒子有基本上相同的规律。

$\Delta \dot{q}_0 / \dot{q}_0$ 主要依赖于相对直径 d_p/R_b 和动能通量。

关于 Q , 对于天气粒子, 由于 Q 较小, 它不影响 $\Delta \dot{m}$ 与动能通量的关系。对于氧化物粒子, 由于 $Q \approx 1/2 \dot{m}_p u_p^2$, 所以可用此准则模拟。

一般说, 模拟动能通量基本上能反映粒子云侵蚀的轮廓, 尽管这是相当粗略的反映。但对于不同的粒子, 总侵蚀率 $\Delta \dot{m}$ 对动能通量的依赖关系不同, 除非 Q 总是很小。对于不同的防热材料, 这种依赖关系也不同。

参 考 文 献

- [1] Grabow, R.M., Smallwood, W.L. and Burns, M.P., AIAA Paper (1976), 76-13.
[2] Schneider, P.J., AIAA Paper (1978), 78-816.
[3] 卞荫贵、钟家康: 高温边界层传热, 北京, 科学出版社 (1986), 278.
[4] Wolf, C.L., Nardo, C.T. and Dahm, T.J., AD-A026619(1975).
[5] Christman, D.R. and Gehring, J.W., *J. of Applied Physics*, 37, 4 (1966), 1579—1587.
[6] 刘大有、吴承康: 空气动力学学报(待发表).
[7] Sheetz, N.W. Jr. and Brady, J.J., *Naval Surface Weapons Center* (1977), TR 76-121.
[8] Hove, D.T. and Shih, W.C.L., AIAA Paper (1977), 77-93.

IMPLICATIONS OF SIMULATING THE PARTICLE KINETIC ENERGY FLUX IN PARTICLE EROSION TESTS

Liu Dayou Wu Chengkang

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract The total rate of erosion/ablation in particle environments is resolved into three parts: the ablation in clean air, the ablation augmentation due to presence of the particle environments and the direct mechanical erosion when the particles strike against the surface. The expression for ablation augmentation is obtained by writing the energy balance on the surface in erosion environments. Finally, three types of collision of the particles with the surface are discussed: (1) perfectly elastic collisions (unrealistic), (2) non-elastic collisions and (3) partially elastic collisions. The conditions under which the particle kinetic energy flux will be a suitable simulation criterion are discussed for the last two types.

Key words particle cloud, erosion, ablation, particle kinetic energy flux simulation.