

# 电弧加热器试验条件下铁质小行星材料烧蚀机理分析

石卫波, 党雷宁, 罗跃, 孙海浩, 黄洁

(中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 绵阳 621000)

**摘要:** 研究铁质小行星进入地球大气层的烧蚀机理, 对评估小行星撞击地球危害具有重要意义。基于试验现象建立了铁质小行星材料烧蚀的熔融烧蚀和熔融层剪切烧蚀模型, 采用具有移动边界的气动热、烧蚀与内部热传导耦合求解技术对铁陨石模型烧蚀试验状态进行了计算。计算分析表明建立的剪切烧蚀模型能够得到与试验在定性上一致的驻点烧蚀速率变化规律。若不考虑液态层流失, 计算得到的规律与试验相反。计算分析结果显示表面蒸发速率与熔融层质量流失速率相比是小量, 表明铁质小行星烧蚀以熔融层剪切流失为主导。可为小行星撞击地球防御提供参考。

**关键词:** 铁质小行星; 烧蚀; 熔融; 剪切流失

**中图分类号:** P185.7; V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)04-0436-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230029

**引用格式:** 石卫波, 党雷宁, 罗跃, 等. 电弧加热器试验条件下铁质小行星材料烧蚀机理分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(4): 436-442.

**Reference format:** SHI W B, DANG L N, LUO Y, et al. Analysis of ablation mechanism of iron asteroid materials under the condition of arc heater test[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(4): 436-442.

## 引言

近地小行星撞击地球是人类生存和发展的潜在威胁之一。近代以来著名的近地天体撞击事件有1908年通古斯大爆炸<sup>[1]</sup>、2003年车里雅宾斯克流星事件等<sup>[2]</sup>。学术界已经基本认同: 6 500万年前1颗直径10 km的小行星撞击现墨西哥尤卡坦半岛位置, 导致包括恐龙在内的全球物种大灭绝, 史称“K-T事件”<sup>[3]</sup>。

小行星以极高速(12~70 km/s)进入地球大气层, 产生巨大的气动加热, 引起材料大规模熔融、汽化和烧蚀, 导致严重的质量损失、外形变化甚至多次解体, 产生的冲击波和热辐射向地面传播, 破坏地面设施和生物<sup>[4-5]</sup>。小行星极高速进入的烧蚀问题, 是小行星进入地球大气的科学问题之一, 是研究进入轨道、光辐射、解体乃至空中爆炸现象的重要基础<sup>[4]</sup>。

小行星材料大致分为3类<sup>[6]</sup>: 铁陨石、石铁陨石、石陨石。目前, 学术界主要通过小行星进入事件观测、地面试验和理论分析3种手段研究小行星的烧蚀问题。在小行星进入事件观测中, 可通过观测到的轨迹分析烧蚀系数<sup>[7]</sup>。然而由于铁质小行星占比少<sup>[8]</sup>或缺乏观测数据, 铁质小行星的烧蚀系数数据较少。在地面试验方面, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)艾姆斯研究中心

(Ames Research Center) 2018年在60 MW电弧风洞中开展了铁质小行星材料进入地球大气层的烧蚀试验<sup>[9]</sup>, 试验模拟热流 $32.9 \text{ MW/m}^2$ 、滞止压力126.5 kPa, 相当于30 m直径的小行星在65 km海拔高度以20 km/s的速度飞行, 试件材料为IAB-MG型Campo Del Cielo铁陨石。中国空气动力研究与发展中心超高速研究所(简称CARDC超高速研究所) 2021年在20 MW电弧加热器上开展了球锥外形铁陨石模型的烧蚀试验<sup>[10]</sup>。理论分析方面的工作大多以石质小行星为研究对象, 针对铁质小行星烧蚀的工作较少。Girin<sup>[11]</sup>基于熔融层的失稳提出熔融喷溅的烧蚀模型, 计算了6 mm直径铁质微流星的烧蚀, 但缺乏与观测或地面试验的对比。Čapek等<sup>[12]</sup>提出另一种熔融喷溅的烧蚀理论, Čapek等<sup>[13]</sup>对该理论进行了改进。该理论认为小行星表面熔融层在温度达到熔点后应立即脱落, 分散成液滴在大气中继续减速。该理论对质量0.006~1.1 g微流星烧蚀的预测结果与光曲线观测结果符合较好。

从研究现状看, 国内外对铁质小行星烧蚀问题研究较少, 且主要针对微流星, 不仅在行星防御范畴之外, 建立的烧蚀理论也缺乏地面试验详细测量支撑。本文基于CARDC超高速研究所电弧加热器铁陨石烧蚀试验中观察到的现象, 建立了铁质小行星材料烧蚀的

熔融层剪切烧蚀模型, 并采用具有移动边界的气动热、烧蚀与内部热传导耦合求解技术, 对烧蚀试验进行了分析。

### 1 铁质小行星材料烧蚀模型与计算方法

CARDC超高速研究所于2021年在20 MW电弧加热器上, 针对如图1所示的球锥外形, 开展了3个状态(见表1)的烧蚀试验<sup>[10]</sup>。电弧加热器产生的高温气体经喷管加速形成高焓高速气流, 对试验模型前端面冲击加热, 通过调整加热器状态参数模拟小行星极高速进入大气层时的驻点热流、压力、焓值, 研究材料的烧蚀特性, 试验和测试方法示意如图2所示<sup>[14]</sup>。支座安装在试验舱中的快速送进系统上, 前端安装试验模型。试验过程中的参数测量: 模型背面设置热电偶测量背温; 高清摄像机记录流场结构和局部材料瞬时变化过程; 比色高温计测量模型驻点附近温度; 红外摄像仪获取模型表面温度分布; 光栅光谱仪测量流场中

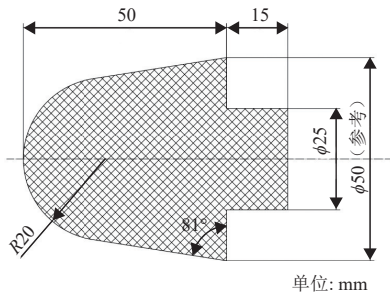


图 1 铁陨石烧蚀试验模型  
Fig. 1 Iron meteorite ablation test model

表 1 烧蚀试验模拟状态

Table 1 Simulation state of ablation test

状态	弧室压力/ MPa	驻点压力/ MPa	驻点热流/ (MW·m <sup>-2</sup> )	滞止焓 (MJ·kg <sup>-1</sup> )
I	1.02	0.51	13.9	7.9
II	0.66	0.34	15.1	10.2
III	0.56	0.28	19.5	14.3

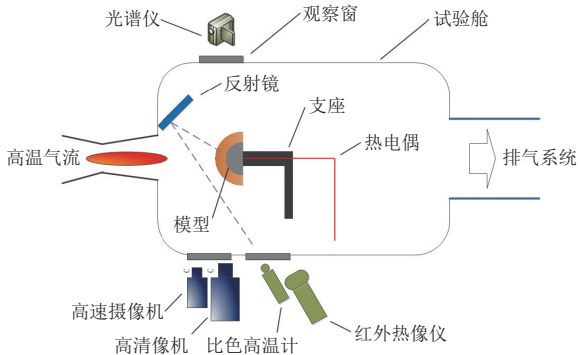


图 2 试验和测试方法示意图  
Fig. 2 Diagram of experimental set-up

的发射光谱; 双目视觉系统在线实时测量模型纵截面轮廓变化。试验后的参数测量主要包括烧蚀质量、线烧蚀率。试验视频截图(气流自左向右)如图3所示, 可看到熔融层受剪切向后流动并覆盖试验模型全表面。

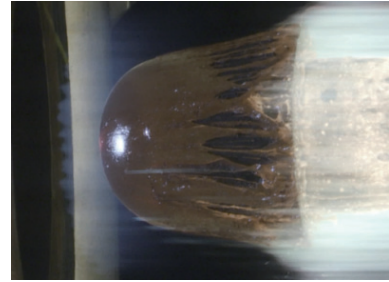


图 3 铁石烧蚀过程的视频截图  
Fig. 3 Video screenshot of iron stone ablation process

上述试验现象得到的启发: 把熔融、蒸发和剪切作为铁质小行星材料烧蚀的主要因素, 熔融是材料在气动加热下由固态到液态的相变, 蒸发是由液态到气态的相变, 剪切是高速气流对熔融层的机械剥蚀作用。

为评估熔融、蒸发和剪切在铁质小行星材料烧蚀中的作用, 本文分别建立熔融烧蚀模型和熔融剪切烧蚀模型, 模拟电弧射流中的球锥外形铁陨石烧蚀情况。熔融烧蚀模型假设表面达到熔点后熔融层立即去除。熔融剪切烧蚀模型则考虑了表面熔融层的蒸发以及在气流剪切下的流失。

烧蚀计算需要和气动热、材料内部热传导耦合起来, 是一个非正常问题(图4)。气动热是热传导计算

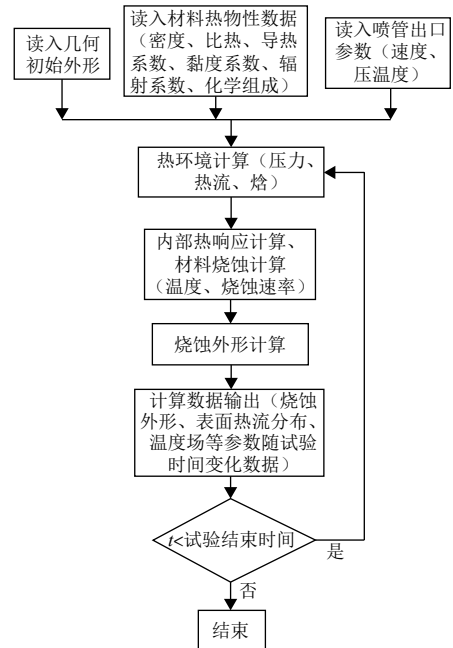


图 4 铁陨石模型气动热/烧蚀耦合计算流程图  
Fig. 4 Flowchart of aerodynamic heat/ablation coupling calculation of iron meteorite model

的边界条件, 内部热传导结果是烧蚀计算的输入条件, 烧蚀引起的外形变化对气动热产生影响, 烧蚀引起的物面后退影响热传导物面边界条件。其中内部热响应和材料烧蚀计算采用紧耦合, 其它模块采用松耦合。

### 1.1 气动热计算方法

电弧加热器试验条件下模型气动热计算根据模型表面不同区域和边界层不同流动状态选取, 驻点热流采用Fay-Riddell公式<sup>[15]</sup>; 层流热流采用Zoby等<sup>[16]</sup>给出的参考焓方法计算简捷, 具有较高的精度; 湍流热流采用布拉休斯平板表面摩擦关系式、Eckert的参考焓压缩性修正以及Colburn的雷诺比拟关系相结合的方法<sup>[17]</sup>。

### 1.2 熔融烧蚀模型与计算方法

对于极高速进入地球大气层的铁质小行星, 气动加热作用时间短, 表面热流只影响局部厚度的温度响应, 尚未深入到物体内部, 因此, 可将铁质小行星的瞬态传热看作半无限大物体的瞬态传热问题。

一维烧蚀过程的导热微分方程为<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

其中:  $T$ 为 $r$ 处的温升;  $a$ 为介质的热扩散系数,  $a = \lambda/(\rho \cdot c)$ ;  $t$ 为导热时间。

初始条件为

$$t = 0, T = T_0 \quad (2)$$

边界条件为

$$r = S(t), T = T_m$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + q_w = \rho L \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

其中:  $S(t)$ 为移动界面;  $L$ 为熔解热 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 传入热量 $q_w$ 等于金属熔化吸收和向小行星内部导热。烧蚀时表面在移动, 采用相对动坐标 $\xi$ ,  $\xi = r - S(t)$ , 导热方程经坐标变换为

$$\frac{d^2 T}{d\xi^2} + \frac{1}{a} \frac{dS(t)}{dt} \frac{dT}{d\xi} = 0 \quad (4)$$

其中:  $T$ 是 $\xi$ 的函数, 偏微分方程转化为常微分方程。由于假定在小的时间步长内小行星表面热流密度为常数 $q_w = \text{const}$ , 由此可认为小的时间步长内烧蚀表面的后退速度也是常数 $V_\infty = \text{const}$ , 即材料在某网格点是逐层烧蚀。

边界条件也作相应变换后得到

$$\begin{cases} \frac{d^2 T}{d\xi^2} + \frac{V_\infty}{a} \frac{dT}{d\xi} = 0 \\ \xi = 0, T = T_m \\ \lambda \frac{dT}{d\xi} + q_w = \rho V_\infty L \\ \xi \rightarrow \infty, T = T_0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可解得小行星内温度分布为

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \exp\left(-V_\infty \frac{\xi}{a}\right) = \exp[-V_\infty(r - S(t))/a] \quad (6)$$

对式(6)求导, 并以 $\left.\frac{dT}{d\xi}\right|_{\xi=0}$ 代入, 由第2个边界条件可得

$$q_w = \rho V_\infty L + \frac{\lambda V_\infty}{a} (T_m - T_0) = \frac{S(t)}{t} [\rho L + \rho c_p (T_m - T_0)] \quad (7)$$

其中:  $a = \lambda/(\rho c_p)$ 为热扩散率;  $c_p$ 为定压比热。

将式(7)简化后, 得到在 $t$ 时刻小行星表面烧蚀厚度为

$$S(t) = \frac{q_w t}{\rho [L + c_p (T_m - T_0)]} \quad (8)$$

由式(8)可得金属材料表面熔融烧蚀速率

$$V_\infty = \frac{q_w}{\rho [L + c_p (T_m - T_0)]} \quad (9)$$

### 1.3 熔融剪切烧蚀模型与计算方法

铁质小行星材料在严酷热环境下, 一方面与氧发生燃烧, 另一方面在气动力/热作用下, 达到熔点熔化向后流动。在熔融剪切模型中, 假设烧蚀表面存在一层薄的液体层, 所有化学反应都发生在液体层表面, 且达到平衡。下面建立液体层表面能量守恒、质量守恒和动量守恒关系式。通过求解这些关系式, 即可获得烧蚀特性。

在固-液交界面会发生如下熔化反应



在液体层外表面, 存在液态层的蒸发和燃烧反应



考虑对流换热、辐射传热、反应热与烧蚀带走的热量, 则物面的能量平衡方程为

$$K_r \psi q_c \left(1 - \frac{h_{aw}}{h_r} + \frac{\Delta Q}{h_r}\right) - q_r = \begin{cases} \rho_T V_\infty [C_T (T_w - T_0) + \Delta H_{-\infty}], & \text{有液态层} \\ k_s \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{\text{solid}} + \rho_T V_\infty \Delta H_{-\infty}, & \text{无液态层} \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $h_{aw}$  为空气在壁温时的焓;  $h_r$  为恢复焓;  $q_r$  为辐射热;  $\Delta Q$  为反应热;  $q_c$  为冷壁热流;  $C_T$  为熔化前材料的比热;  $\rho_T$  为材料密度;  $V_{-\infty}$  为烧蚀速率;  $\Delta H_{-\infty}$  为单位质量熔化潜热;  $k_s$  为固体热传导系数;  $T_w$  为物面温度。

空气在壁温时的焓  $h_{aw}$  表达式为

$$h_{aw} = C_{O_2,e} h_{O_2} + C_{N_2,e} h_{N_2} \quad (14)$$

其中:  $h$  为静焓;  $C$  为质量分数。

反应热  $\Delta Q$  用下式计算

$$\Delta Q = B_{Fe} \Delta Q_{Fe} = \alpha_{Fe} f_{Fe} B_{-\infty} \Delta Q_{Fe} \quad (15)$$

$$B_{Fe} = \alpha_{Fe} f_{Fe} B_{-\infty} \quad (16)$$

$$\Delta Q_{Fe} = h_{Fe} + \frac{M_{O_2}}{M_{Fe}} h_{O_2} - \frac{M_{Fe_3O_4}}{M_{SiO_2}} h_{Fe_3O_4} \quad (17)$$

其中:  $\Delta Q_{Fe}$  在计算中取正值。熔化潜热  $\Delta H_{-\infty}$  的表达式为

$$\Delta H_{-\infty} = f_{Fe_2} \Delta h_m \quad (18)$$

其中,  $\Delta h_m = 269.55 \text{ kJ/kg}$ 。

式 (15) 中其它各量表达式为

$$B_{-\infty} = \frac{\dot{m}_{-\infty}}{K_r \psi q_c / h_r} = \frac{\rho_T V_{-\infty}}{K_r \psi q_c / h_r} \quad (19)$$

$$\psi = \frac{1}{1 + Af B_{-\infty}} \quad (20)$$

对式 (13) 左侧化简得到

$$q = K_r \psi q_c \left[ \left( 1 - \frac{h_{aw}}{h_r} \right) + \alpha_{Fe} f_{Fe} B_{-\infty} \frac{\Delta Q_{Fe}}{h_r} \right] \quad (21)$$

假定边界层内化学冻结, 化学反应在壁面进行, 且假定普朗特数和 Lewis 数  $L_e = 1$  情况下, 由物面的质量守恒关系的边界层扩散方程可得到

$$\dot{m}_{Fe,w} = \dot{m}_w K_{Fe,w} - \rho_e u_e C_H (K_{Fe,e} - K_{Fe,w}) \quad (22)$$

设式 (22) 中  $K_{Fe,e} = 0$ , 并除以  $\rho_e u_e C_H$  有

$$B_{-\infty} \alpha_{Fe} f_{Fe} = (1 + f B_{-\infty}) K_{Fe,w} \quad (23)$$

其中:  $B_{-\infty}$  为无量纲烧蚀速率,  $B_{-\infty} = \frac{\dot{m}}{\rho_e u_e C_H}$ ;  $f$  为总汽化分数,  $f = \alpha_{Fe} f_{Fe}$ ;  $f_{Fe}$  为  $Fe$  元素的汽化分数。

从道尔顿定律  $P_i = K_i \frac{MP_e}{M_i}$  得

$$\frac{1}{K_{Fe,w}} = \frac{MP_e}{P_V M_{Fe}} \quad (24)$$

由式 (23) 和 (24) 可得

$$\alpha_{Fe} = \frac{1}{f_{Fe}} \frac{\frac{1}{B_{-\infty}}}{\frac{\bar{M} P_e}{M_{Fe} P_V} - 1} \quad (25)$$

其中:  $\bar{M}$  为气体平均分子量;  $P_e$  为边界层外缘压力;  $P_V$  为  $Fe$  的蒸气压。

$$P_V = 101325 \times 10^{\left(6.347 - \frac{19547}{T_w}\right)} \quad (26)$$

在液体层表面有如下动量守恒关系

$$\frac{\rho_T}{\rho_L} (1-f) V_{-\infty} = \frac{2\delta^2}{\mu_{wL}} \left( \frac{d\tau_w}{ds} - 2\delta \frac{d^2 p_e}{ds^2} \right), \text{ 驻点} \quad (27)$$

$$\frac{\rho_T}{\rho_L} \int_0^s (1-f) V_{-\infty} \mu_{wL} r_b ds = r_b \delta^2 \left( \tau_w - 2\delta \frac{dp_e}{ds} \right), \text{ 非驻点} \quad (28)$$

其中:  $\rho_T$  为固体材料密度;  $\rho_L$  为液体层密度;  $\delta$  为液体层厚度;  $\tau_w$  为剪切应力;  $r_b$  为物体径向坐标。

式 (13)、(25)、(27) ~ (28) 是联系 4 个未知量  $B_{-\infty}$ 、 $T_w$ 、 $\alpha_{Fe}$ 、 $\bar{M}$  的超越方程组, 可用迭代法求解。其中  $B_{-\infty}$  可以从式 (13) 和  $B_{-\infty}$  的定义得到

$$B_{-\infty} = \frac{h_s}{[C_T(T_w - T_0) + \Delta H_{-\infty}]} \cdot \left\{ \left( 1 - \frac{h_{aw}}{h_r} \right) + \alpha_{Fe} f_{Fe} \Delta Q_{Fe} \frac{B_{-\infty}}{h_r} - \frac{\sigma \varepsilon T_w^4 - q_r}{K_r \psi q_{w0}} \right\} \quad (29)$$

联立方程组求解得, 然后给出烧蚀速率  $V_{-\infty}$

$$V_{-\infty} = \frac{B_{-\infty} K_r \psi \dot{q}_{w0}}{\rho_T h_s} \quad (30)$$

## 2 铁陨石烧蚀计算结果分析

铁陨石烧蚀试验是在 CARDIC 超高速研究所 20 MW 电弧加热器设备开展。为便于铁陨石烧蚀理论与试验测量结果对比分析, 根据模拟的参数设计成球锥模型, 头部半径  $R = 20 \text{ mm}$ , 半锥角  $9^\circ$ , 高度  $70 \text{ mm}$  (图1)。铁陨石热物性参数为<sup>[9]</sup>: 密度  $7827.234 \text{ kg/m}^3$ , 熔点  $1846 \text{ K}$ , 比热  $364 \pm 19 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $42.9 \pm 15.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 辐射系数  $0.671$ , 熔化潜热  $269.55 \text{ kJ/kg}$ 。铁陨石模型烧蚀试验状态参数有 3 个 (表1), 试验时间  $4 \text{ s}$ 。

根据 1.2 节建立的铁陨熔融烧蚀计算模型, 本文分别对表1的 3 个试验状态进行了计算。第 I 状态驻点平均线烧蚀计算速率  $1.55 \text{ mm/s}$ , 第 II 状态驻点平均线烧蚀计算速率  $2.14 \text{ mm/s}$ , 第 III 状态驻点平均线烧蚀计算速率  $2.50 \text{ mm/s}$ 。烧蚀开始的时间随热流的增加提

前,得到的驻点烧蚀速率也随驻点热流的增加而增大,而地面试验测得的驻点烧蚀速率随驻点压力的增加而增大(图5,表2)。计算与试验在烧蚀速率差异的原因是铁陨石烧蚀计算模型为熔融模型,假定表面材料温度达到熔点就发生质量损失,没有考虑铁陨石试验高温熔融流动剪切作用。

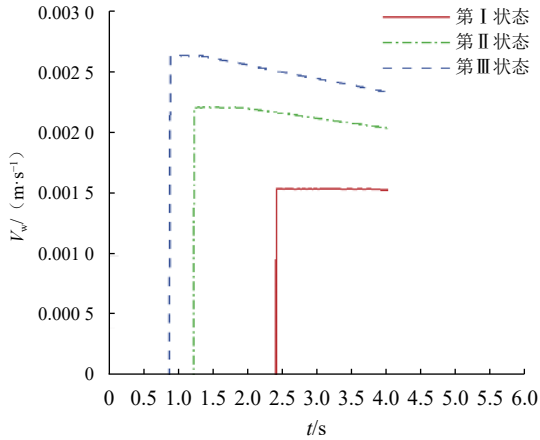


图5 驻点烧蚀速率随时间变化(熔融烧蚀模型)

Fig. 5 Ablation rate of stagnant point changes with time (melting ablation model)

度沿物面的分布看,在头部区域附近较厚,在肩部较薄,与试验观察的现象一致(图3)。头部高热流区域,铁陨石材料在高温下熔融并不断被气流吹走,部分覆盖在肩部低热流区,而模型肩部大部分区域热流低,陨石材料还未发生熔融烧蚀(图9)。

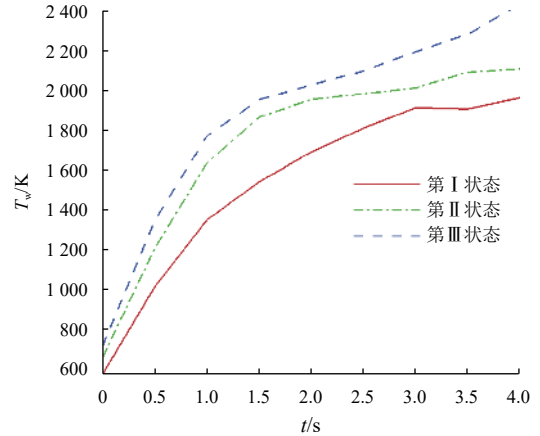


图6 驻点温度随时间变化

Fig. 6 Temperature of stagnant point changes with time

表2 铁陨石球锥试件烧蚀试验烧蚀特征计算与试验对比  
Table 2 Calculation and experimental comparison of ablation characteristics of iron meteorite cone specimen

状态	驻点烧蚀速率/ (mm·s <sup>-1</sup> )			液态层 厚度/ mm	表面蒸发 速率/ (mm·s <sup>-1</sup> )	液态层质量 流失速率/ (mm·s <sup>-1</sup> )
	计算 (熔融剪 切模型)	计算 (熔融 模型)	试验	计算(物面 6 mm处)	计算	计算
I	1.91	1.55	9#: 1.97	2.9	$2.07 \times 10^{-19}$	1.91
II	1.86	2.14	11#: 1.55	2.3	$2.76 \times 10^{-19}$	1.86
III	1.80	2.50	10#: 1.56	2.2	$3.34 \times 10^{-19}$	1.80

根据1.3节建立的铁陨石熔融剪切烧蚀计算模型,本文对铁陨石球锥试件(图1)试验状态开展计算分析,计算与试验测量结果比较见表2。铁陨石球锥试件烧蚀试验的计算结果如图6~9所示。图6~7横坐标为时间,图8、图9横坐标为沿物面弧长(从驻点算起),图6纵坐标为驻点温度,图7、图9纵坐标为烧蚀速率,图8纵坐标为液态层厚度。试验状态I~III的试验条件是热流递增、驻点压力递减。热流越高,导致温度越高(图6)、越早烧蚀,状态I~III开始烧蚀的时间分别为3、1.5和1 s(图7)。稳定烧蚀后,驻点烧蚀速率随试验驻点压力增加而增大(图7)。液体层的黏性系数随壁温的增加而降低,因此热流和温度越高(从状态I~III),液体层越薄(图8)。从液体层厚

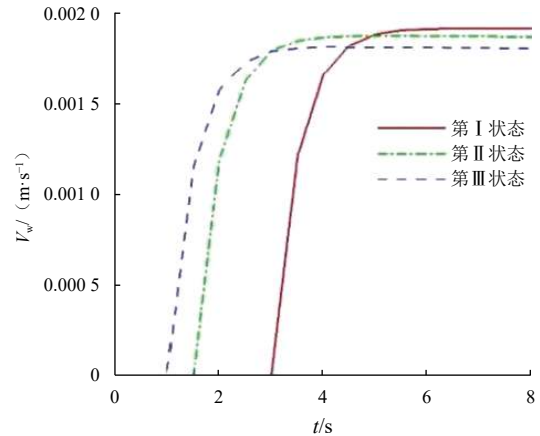


图7 驻点烧蚀速率随时间变化

Fig. 7 Ablation rate of stagnant point changes with time surface

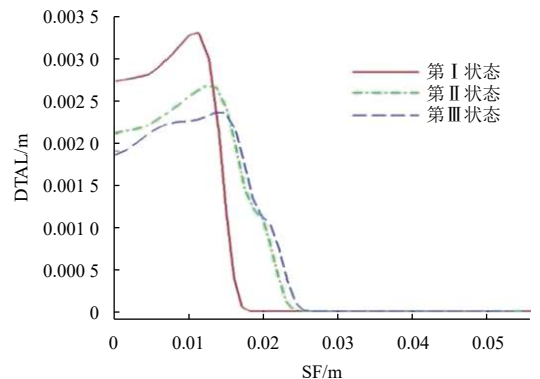


图8 液体层厚度随物面变化

Fig. 8 Thickness of liquid layer changes with the object surface

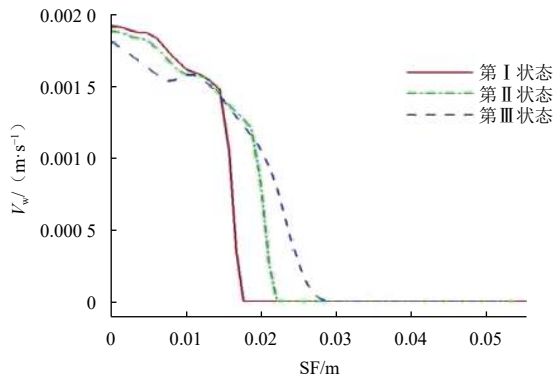


图9 烧蚀速率随物面变化

Fig. 9 Ablation rate changes with object surface

计算与试验对比如表2所示, 表2中包含了熔融剪切烧蚀模型与不考虑剪切的熔融烧蚀模型计算结果。在熔融剪切烧蚀模型下, 状态 I ~ III 的驻点线烧蚀速率分别为 1.91、1.86 和 1.80 mm/s, 随试验状态的变化规律在定性上与试验相符。而熔融模型得到的驻点烧蚀速率与试验相反, 且热流越高, 计算结果与试验测量结果相差越大。这说明熔融层的剪切是烧蚀模型中必须考虑的因素。由表2还可看到, 表面蒸发速率与液态层流失速率相比是小量, 说明熔融层的剪切流失是烧蚀的主要机理。

### 3 结 论

本文针对铁质小行星以极高速进入地球大气层, 在严酷气动加热作用下发生高温熔融烧蚀问题, 分别建立了熔融烧蚀计算模型和熔融剪切烧蚀计算模型。通过对电弧加热器试验条件下铁陨石球锥模型试验状态的计算分析, 获得了铁陨石高温熔融层剪切流失的烧蚀机理。下一步, 将根据建立的铁质小行星进入大气层高温熔融剪切烧蚀模型, 评估以极高速进入地球大气层铁质小行星熔融烧蚀情况, 为小行星撞击地球防御提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] CHYBA C F, THOMAS P J, ZAHNLE K J. The 1908 tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid[J]. *Nature*, 1993, 361: 40-44.
- [2] POPOVA O P, JENNISKENS P, EMEL'YANENKO V, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery and characterization[J]. *Science*, 2013, 342(6162): 1069-1073.
- [3] SCHULTE P, ALEGRET L, ARENILLAS I, et al. The chixulub asteroid impact and mass extinction at the cretaceous-paleogene boundary[J]. *Science*, 2010, 327: 1214-1218.
- [4] 柳森, 党雷宁, 赵君尧, 等. 小行星撞击地球的超高速问题[J]. *力学学报*, 2018, 50(6): 1311-1327.

LIU S, DANG L N, ZHAO J Y, et al. Hypervelocity issues of earth impact by asteroids[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1311-1327.

- [5] 党雷宁, 柳森, 白智勇, 等. 小行星进入与撞击效应评估模型敏感性研究[J]. *力学学报*, 2021, 53(1): 278-292.
- [6] DANG L N, LIU S, BAI Z Y, et al. Sensitivity research on models of earth entry and impact effects by asteroids[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(1): 278-292.
- [7] MASON B H. Meteorites[J]. *American Scientist*, 1967, 55(4): 429-455.
- [8] ČEPLECHA Z, BOROVIČKA J, ELFORD GW, et al. Meteor phenomena and bodies[J]. *Space Science Reviews*, 1998, 84: 327-471.
- [9] 李世杰. 小行星的分类及飞行器探测历史[J]. *大众科学*, 2021, (1): 56-59.
- [10] AGRAWAL P, JENNISKENS P. Arcjet ablation of stony and iron meteorites[C]//Proceedings of 2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Georgia, USA: [s. n.], 2018.
- [11] 王磊, 罗跃, 党雷宁, 等. 模拟陨石进入的电弧风洞烧蚀试验及辐射特性分析[C]//第四届全国行星防御研讨会论文集. 桂林: 第四届全国行星防御研讨会, 2021.
- [12] GIRIN O G. A hydrodynamic mechanism of meteor ablation: the melt-spraying mode[J]. *Astronomy Astrophysics*, 2017, 606: A63.
- [13] ČAPEK D, BOROVIČKA J. Ablation of small iron meteoroids—first results[J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 143: 159-163.
- [14] ČAPEK D, KOTEN P, BOROVIČKA J, et al. Small iron meteoroids—Observation and modeling of meteor light curves[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 625: A106.
- [15] 罗跃, 王磊, 党雷宁, 等. 模拟Chelyabinsk小行星进入的烧蚀实验[J]. *力学学报*, 2020, 52(5): 1362-1370.
- [16] LUO Y, WANG L, DANG L N, et al. Arcjet ablation experiment to simulate the chelyabinsk asteroid entry[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(5): 1362-1370.
- [17] FAY J A, RIDDELL F R. Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1958, 25(2): 73-85.
- [18] ZOBY E V, MOSS J N, SUTTON K. Approximate convective heating equations for hypersonic flows[J]. *Journal of Service Research*, 1981, 18: 64-70.
- [19] 张志成, 潘梅林, 刘初平, 等. 高超声速气动热和热防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 222-284.
- [20] 吴斌, 夏伟, 汤勇, 等. 身管熔化烧蚀的预测数学模型[J]. *火炮发射与控制学报*, 2002, 24(1): 5-10.
- [21] WU B, XIA W, TANG Y, et al. Mathematical model for predicting melt-erosion in gun barrels[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2002, 24(1): 5-10.
- [22] OSTROWSKI D, BRYSON K. The physical properties of meteorites[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 165: 148-178.

作者简介:

石卫波(1972-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 气动热与热防护。  
通信地址: 四川省绵阳市二环路南段6号中国空气动力研究与发展中心(621000)

电话: (0816)2465219

黄洁(1968-), 女, 研究员, 主要研究方向: 高超声速空气动力学, 超高速碰撞动力学。本文通信作者。

通信地址: 四川省绵阳市二环路南段6号中国空气动力研究与发展中心(621000)

# Analysis of Ablation Mechanism of Iron Asteroid Materials under the Condition of Arc Heater Test

SHI Weibo, DANG Leining, LUO Yue, SUN Haihao, HUANG Jie

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** When the asteroid enters earth's atmosphere at a very high speed, the surface temperature rises and the surface material melts and loses under the severe aerodynamic heat. Studying the ablation mechanism of iron asteroids entering the Earth's atmosphere is of great significance to study the ablation mechanism of iron asteroids entering the Earth's atmosphere to evaluate the impact of such asteroids on the earth. In 2021, the Hypervelocity Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center carried out the ablation test of the spherical cone-shaped iron meteorite model (head radius 20 mm, half cone angle 9 degrees) on the arc heater. The tested simulated state is that the stagnation heat flux is 13.9~19.5 MW/m<sup>2</sup> and the stagnation pressure is 0.51~0.28 MPa. In this paper, based on the experimental phenomenon, the melting ablation model and the melting layer shear ablation model of iron asteroid material ablation are established. and the ablation test state of meteorite model is calculated by using the coupled solution methodology of aerodynamic heat, ablation and internal heat conduction with moving boundary. The calculation and analysis show that the shear ablation model established in this paper can obtain qualitatively consistent stagnation point ablation rate. If the loss of liquid layer is not considered, the calculated law is contrary to the experiment. The calculation shows that the surface evaporation rate is small compared with the mass loss rate of molten layer, which indicates that the ablation of iron asteroids is dominated by the shear loss of molten layer. It can provide reference for asteroid impact Earth defense.

**Keywords:** iron asteroid; ablation; melting; shear loss

## Highlights:

- Based on the phenomenon of iron meteorite ablation test, the melting ablation model and the melting layer shear ablation model of iron asteroid material ablation are established.
- The coupled solution methodology of aerodynamic heat, ablation and internal heat conduction with moving boundary is used to calculate the ablation test state of iron meteorite model.
- The established melting shear ablation model can obtain the change law of stagnation point ablation rate which is qualitatively consistent with the experiment.
- The calculation and analysis show that the ablation of iron asteroids is dominated by the shear loss of molten layer.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]