

# Gr/A1 防热材料的传热特性

武高辉 刘祥 陈苏 武练梅 白雪

(哈尔滨工业大学金属复合材料与工程研究所, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 通过对 Gr/A1 防热材料进行氧乙炔烧蚀实验,测定其在烧蚀过程中的升温特性曲线。发现在烧蚀过程中 Gr/A1 中 A1 的熔化和蒸发有效地减缓了材料的升温速率,起到很好的热防护作用,并根据 Gr/A1 的传热特性,建立了传热模型,理论计算与实验结果吻合较好。

**关键词** Gr/A1,氧乙炔烧蚀,传热特性,传热模型

## Heat-Transfer Properties of Gr/A1 Thermal Protection Materials

Wu Gaohui Liu Xiang Chen Su Wu Lianmei Bai Xue

(The Metallic Composites and Engineering Institute of HIT, Harbin 150001)

**Abstract** Temperature rising curves of Gr/A1 thermal protection materials tested by oxyacetylene ablation show that Al escaped from Gr/A1 thermal protection materials absorbing heat to slow down temperature-rising rate, thus realizing thermal protection effectively by evaporating and melting. Furthermore, this paper built the heat-transfer model according to heat-transfer properties of Gr/A1 thermal protection materials.

**Key words** Gr/A1, Oxyacetylene ablation, Heat-transfer property, Heat-transfer model

### 1 前言

通常要求防热材料在高温、高压或高速冲刷条件下,一要隔热,保护其他部件温度维持在正常工作范围内;二要保持气动外形,保证气动力学关系不变。

Gr/A1、Gr/Mg 是以石墨为基体,在其中渗入冷却剂 Al、Mg 来实现防热的一类防热材料。这种冷却剂发挥三重作用:一是依靠自身的液化、气化来消耗外界的热量;二是消耗外界的氧气,从而切断基体氧化的源头;三是在高温氧化的同时在表面自发生成氧化物陶瓷膜,从而保护基体不被烧蚀<sup>[1]</sup>。由于烧蚀过程中通过耗散热量和氧来达到防热的目的,因此也称之为耗散防热材料。这种材料具备轻质(密度 < 2.3 g/cm<sup>3</sup>)、耐高温(> 2900)、非烧蚀(线烧蚀率 < 1 μm/s)三个基本性能,并且弯曲强度、弹性模量和断裂韧性都比其基体有了显著提高<sup>[2]</sup>。但目前 Gr/A1 的传热特性尚不清楚,本文通过对其进行氧乙炔烧蚀实验,测定烧蚀过程中的材料的升温特性曲线,分析 Gr/A1 的传热特性,建立传热模型。

### 2 实验

#### 2.1 材料

采用压力浸渗方法<sup>[3]</sup>制备纯 Al, Al 的热物理参数见表 1。

表 1 纯 Al 的物理化学参量

Tab 1 Physical and chemical parameters of pure aluminum

密度 / g·cm <sup>-3</sup>	熔点 /	沸点 /	熔化潜热 / kJ·mol <sup>-1</sup>	蒸发潜热 / kJ·mol <sup>-1</sup>
2.70	660	2519	10.71	294.0

#### 2.2 氧乙炔烧蚀试验

采用 GJB 323A—96 进行烧蚀实验,试样尺寸为 30 mm × 10 mm,烧蚀时间为 60 s,氧乙炔焰最高温度 3500。试验条件如表 2 所示。

表 2 氧-乙炔火炬的工作参数

Tab 2 Working parameters of oxyacetylene torch

热流密度 / kW·m <sup>-2</sup>	氧气流量 / L·h <sup>-1</sup>	乙炔流量 / L·h <sup>-1</sup>	氧气压力 / MPa	乙炔压力 / kPa
4255.6	1512	1116	0.4	95

收稿日期: 2009 - 06 - 24

作者简介: 武高辉, 1955 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事金属基复合材料的研究。E-mail: wugh@hit.edu.cn

采用 K型热电偶测量试样背面和厚度为 5 mm 处的升温特性曲线,采用红外测温仪对材料表面温度进行测量。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 烧蚀实验结果

图 1 给出 Gr/AI 纵向温度分布梯度图。

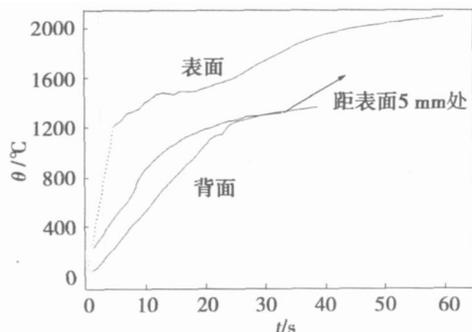


图 1 Gr/AI 防热材料纵向温度分布图

Fig 1 Longitudinal temperature distribution of Gr/AI thermal protection materials

从图 1 中可以看出 Gr/AI 的升温特性曲线成阶梯状,即在烧蚀开始阶段升温速率很快,随着冷却剂 AI 开始熔化和蒸发吸热,材料的升温速率变缓。随着烧蚀过程的继续,气液边界层逐渐向下移动,在边界层以上的材料继续快速升温,从而形成阶梯状升温曲线。由于热电偶测温范围的限制,图 1 没有给出距表面 5 mm 处试样内部在达到 1300 以后再升温的过程。

#### 3.2 传热模型建立

通过分析发现 Gr/AI 防热材料在烧蚀过程中升温规律较明显,且有代表性,因此本文建立研究 Gr/AI 的传热模型。

设  $T_{p1}$  是 AI 熔化温度,  $T_{p2}$  是 AI 蒸发温度。当 Gr/AI 受热后,材料表面温度升高,在升温过程中依靠材料的本身热容吸收一部分热量,同时向内部结构通过固体热传导方式导入一部分热量。只要表面温度低于  $T_{p1}$ ,上述状态便持续下去,这时整个防热层类似热容式吸收防热结构。随着加热继续进行,表面温度继续升高到  $T_{p1}$ ,AI 开始熔化,继之升温  $> T_{p2}$ ,液态金属 AI 开始蒸发,从而整个耗散防热材料层形成 4 个不同的层,即陶瓷层、气化层、液化层和原始材料层。

在整个烧蚀防热过程中,各层内发生的物理化学现象以及由此表现出来的热效应表述如下。

(1)原始材料层,温度  $< T_{p1}$ ,材料无熔化,故没有化学及物理状态变化。在材料内部只有两个传热效应,即材料本身的热容吸热和向材料内部的导热。

(2)液化层,内边界温度为  $T_{p1}$ ,外边界温度为

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2010年 第1期

$T_{p2}$ ,此层内进行着 3 种热现象:AI 的熔化的吸热;向内部的导热;材料的热容吸热。

(3)气化层,此层温度均  $> AI$  的蒸发温度,主要由 AI 蒸气和多孔石墨组成。发生在该层的热现象也有 3 种:多孔石墨及 AI 蒸气升温时的吸热、向内的导热、AI 的蒸发吸热。

(4)陶瓷层,发生复杂的热现象,既有加热,也有散热和放热。属于加热的有:气流对流加热。属于散热的有:表面的辐射,气态冷却剂注入热边界层,改变表面的温度分布,使气动加热减小(气体的引射效应)以及表面向内层的导热。属于放热得有:AI 的氧化放热。

鉴于本文的实验条件,没有在表面生成陶瓷层,所以仅讨论三个层面中的热传导问题,参考发汗冷却模型<sup>[3-5]</sup>建立 Gr/AI 复合材料传热模型。此烧蚀模型建立在以下基本假设条件下:

- (1)将材料形状设定为无限大平板模型,热量仅沿 y 方向传导,即简化为一维非稳态导热问题;
- (2)冷却剂与石墨间不存在反应;
- (3)不考虑机械剥蚀,不考虑氧化反应;
- (4)流经某一截面的气体全部是冷却剂,不考虑外部气体流入的影响。

烧蚀传热的物理模型如图 2 所示,由三层组成,包括气化层、液化层和原始材料层以及两个两相移动界面,一个外加热表面,一个背面的绝热面。

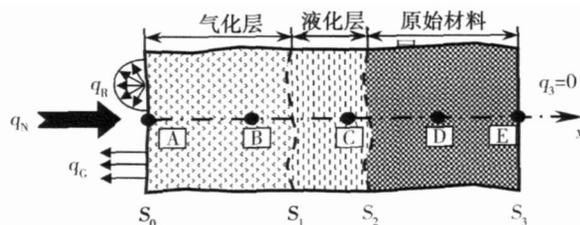


图 2 烧蚀传热模型结构示意图

Fig 2 Structure scheme of ablation heat-transfer model

在图 2 中,点 A, B, C, D, E 均匀分布,用于监控这些点在烧蚀过程中温度随时间的变化情况。由于各层的传热机理相差很大,因此对每层控制微分方程及其边界条件和边界能量方程分开描述。

##### 3.2.1 气化层

控制方程:

$$c_c c_{p_c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = c_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{d_c}{dT_c} \left( \frac{\partial T_c}{\partial x} \right)^2 + m_{p_g} \frac{\partial T_c}{\partial x} \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq s_1$$

$$\text{边界条件: } x = 0, -c_c \frac{\partial T_c}{\partial x} = q_n - q_r - q_g \quad (2)$$

$$x = s_1, T_s = T_v \quad (3)$$

气液移动边界  $s_1$  处,必须满足温度连续条件和能

量守恒条件,即

$$T_c [s_1(t), t] = T_1 [s_1(t), t] = T_v \quad (4)$$

$$c \frac{\partial T_c}{\partial x} - 1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \kappa \frac{ds_1(t)}{d} \quad (5)$$

式中,  $m_{p_1}$  为 A1 蒸气质量流率,  $\bar{c}_p$  为 A1 蒸气比热容,  $T_v$  为 A1 蒸气蒸发温度,  $q_n$  为气动加热热流,  $q_R$  为表面向外的辐射热流,  $q_G$  为 A1 蒸气引射热流,  $s_1$  为气液移动界面位置。

### 3.2.2 液化层

控制方程:

$$1 c_{p_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = 1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{d}{dT_1} \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)^2 \quad (6)$$

$s_1 \quad x \quad s_2$

边界条件:

$$x = s_1, T_1 = T_v \quad (7)$$

$$x = s_2, T_1 = T_m \quad (8)$$

液固移动边界  $s_2$  处, 必须满足温度连续条件和能量守恒条件, 即

$$T_1 [s(t), t] = T_s [s(t), t] = T_m \quad (9)$$

$$1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \kappa_m \frac{ds_2(t)}{d} \quad (10)$$

式中,  $T_m$  为 A1 熔化温度,  $s_2$  液固移动界面位置。

### 3.2.3 原始材料层

控制方程:

$$s c_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{d}{dT_s} \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 \quad (11)$$

$s_2 \quad x \quad s_3$

$$\text{边界条件: } x = s_2, T_s = T_m \quad (12)$$

$$x = s_3, q_b = 0 \quad (13)$$

考虑了 1.0 cm 厚度样品的热响应特性曲线, 如不作特殊说明, 计算参数为: 时间步长  $t = 0.05$  s, 初始温度 25 ; A1 的体积分数为 20%; 热导率  $1(T) = 160.737 + 0.133T$ , 热容  $c_p(T) = 766.675 + 0.4477T$ , 热流密度为 4.255 kW/m<sup>2</sup>。根据工业镀铝参数, 液态 A1 在 1200~1300 可以实现稳定蒸发<sup>[7]</sup>, 因此将背温定义为 1300 进行模拟计算。

通过对 Gr/A1 烧蚀过程的分析, 将整个烧蚀过程分为 4 个阶段: 第一阶段, 非稳态吸热升温过程; 第二阶段, 吸热熔化过程; 第三阶段, 液态 A1 升温过程; 第四阶段, 烧蚀蒸发过程。在第一阶段, 试样吸热升温, 直到最高温度达到熔化温度, 进入第二阶段; 在第二阶段中, 随着加热的继续进行, 材料的温度持续升高, A1 从开始熔化, 到第二阶段结束时, A1 完全熔化, 该过程计算区域的最高温度没有达到 A1 的蒸发温度; 在第三阶段中, 由于材料的最高温度还没有到达 A1 的蒸发温度, 此时液态 A1 将继续吸热升温, 直至最高

温度达到 A1 的蒸发温度, 进入第四阶段; 第四阶段是液态 A1 的蒸发烧蚀过程, 一直持续到烧蚀过程结束。分别计算四个阶段的升温曲线, 之后将四个阶段结合起来得到整个烧蚀过程的温度变化曲线。图 3 给出了 Gr/A1 隔热材料纵向温度梯度模拟结果。

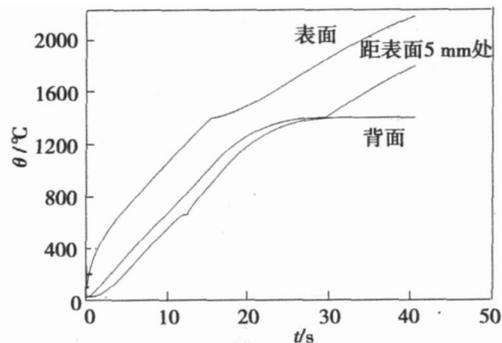


图 3 Gr/A1 隔热材料纵向温度梯度模拟结果

Fig 3 Simulation result of longitudinal temperature gradient of Gr/A1 thermal protection materials

从图 3 中可以看出 Gr/A1 各部的升温曲线呈梯状, 与实验结果一致, 证明了在距表面 5 mm 的试样内部温度在达到 1300 之后仍会继续升温。通过与图 1 对比发现 Gr/A1 表面的最高温度在 2000 左右, 而背面的平衡温度都在 1300 附近, 模拟结果与实验结果基本吻合, 证明了本文对 Gr/A1 隔热材料烧蚀过程的分析和建立的传热模型是正确的。

## 4 结论

(1) 在石墨中加入 A1, A1 通过熔化和蒸发很好地抑制了材料的升温速率, 实验与计算结果相吻合。

(2) 通过对 Gr/A1 传热过程的分析, 建立传热模型, 并与实验结果对比验证了烧蚀模型的正确性。

## 参考文献

- 姜鹤. Gr/A1-Mg 复合材料的制备、组织结构与抗热震性能研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2007
- 乔菁. 耐热耐烧蚀 Al/Gr 复合材料的组织与性能. 哈尔滨工业大学工学学士学位论文. 2005
- 武高辉, 陈苏, 张强等. 一种真空压力浸渗制备金属基复合材料的方法. 中国. C22C1/10(2006.01) I 200810064995.2 2008.7.25
- 杨学实. 变域传热发汗控制理论. 北京: 北京大学出版社, 2002
- 徐燕侯, 吴广钮, 弓广辉等. 有烧蚀的发汗冷却控制系统动态性能的分析与数值模拟. 系统工程与电子技术, 1993; 10: 75~181
- 杨学实, 王侠超. 发汗冷却控制动态响应数值分析. 自动化学, 1988; 14(3): 184~190
- 刘仁庆, 黄秀珠编著. 纸张指南. 北京: 中国轻工业出版社, 2004: 304~330

(编辑 吴坚)