

# 四种防热材料的烧蚀侵蚀试验研究

冯志海 余瑞莲 姚承照 李仲平

( 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室 北京 100076 )

**文 摘** 主要研究了 2.5D 高硅/酚醛、短纤维模压高硅/酚醛、斜缠高硅/酚醛、三向碳/碳等四种材料的驻点烧蚀侵蚀性能。结果表明在燃气流中粒子含量、速度、粒子种类对材料驻点烧蚀侵蚀有非常大的影响,在烧蚀侵蚀过程中,粒子的侵蚀起主要作用。

**关键词** 复合材料,防热材料,烧蚀侵蚀性能

## Ablative Erosion Performance of Four Thermal Protection Composite Materials

Feng Zhihai Yu Ruilian Yao Chengzhao Li Zhongping

( National Defence Science & Technology Key Laboratory of Advanced Functional Composites,  
Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076 )

**Abstract** This paper briefly investigates ablative erosion performance of four thermal protection composite materials, 2.5DQP, MYDGP, XCGGP and 3DCC. Test results show that ablative erosion properties are affected briefly by particle kinds, particle velocity and particle content in solid rocket motor combustion gas. In the process of ablative erosion, particles are the dominant effect factor.

**Key words** Composite, Thermal protection material, Ablative erosion

### 1 前言

固体火箭发动机的燃气流中存在有氧化铝粒子,所以固体火箭发动机燃气流的防护结构中,不但需要进行热防护,也需要对氧化铝粒子的侵蚀进行防护。虽然不同防热材料在固体火箭发动机喷管条件下的烧蚀侵蚀研究已较成熟<sup>[1,2]</sup>,但在有些场合,如燃气流与防护面垂直情况下,防热材料在该条件下的烧蚀侵蚀为驻点烧蚀侵蚀行为,烧蚀过程中的侵蚀更为严重。因此为了研究现有的四种防热材料在固体火箭发动机燃气流驻点烧蚀侵蚀条件下的烧蚀侵蚀行为,对 2.5D 高硅/酚醛(2.5DQP)、短纤维模压高硅氧/酚醛(MYDGP)、斜缠高硅氧/酚醛

(XCGGP)、和三向碳/碳(3DCC)等四种烧蚀防热材料进行了烧蚀侵蚀试验研究。

### 2 四种防热材料的成型工艺、特点及试样制备

表 1 给出了进行烧蚀侵蚀试验的四种防热材料的试样尺寸、密度、成型工艺方法和性能特点。

### 3 烧蚀侵蚀试验

实验设备为电弧加热器,粒子在电弧喷管后的加速段引入,采用射流驻点烧蚀侵蚀方式进行试验,烧蚀试验参数为气体总温 3 450 K,驻点压力 0.95 MPa ~ 1.0 MPa,喷管出口气流速率 1 000 m/s ~ 1 700 m/s,出口气体温度 1 273 K,粒子含量 7% ~ 11%(质量分数,下同)。虽然气体温度、压力、速度和理论计

收稿日期:2001-08-26

冯志海,1965 年出生,高级工程师,主要从事树脂基复合材料的研究工作

算的参数接近,但是由于粒子是在电弧喷管后加入的,粒子的温度低于气流温度,更低于固体火箭发动机燃烧产生的氧化铝粒子的温度。因此试验时加入的粒子与发动机燃烧产生的氧化铝粒子的物理状态

是不一致的,试验加入的粒子由于温度低、相对硬度大,而发动机燃烧产生粒子温度高、硬度低,所以该试验条件下粒子侵蚀要比实际发动机燃气流中的氧化铝粒子的侵蚀苛刻。

表 1 四种烧蚀防热材料

Tab.1 A brief of four thermal protection composite materials

材料种类	试样尺寸 /mm	密度 /g cm <sup>-3</sup>	成型工艺方法	性能特点
2.5DQP	40 ×17	1.65	高硅氧纤维通过一定的编织工艺,编织成 2.5D 平面高厚织物,采用酚醛树脂 RTM 工艺复合成型,成型工艺简单,易成型复杂形状制品,制品性能稳定性好	材料的力学性能高,尤其是层间强度高,适合 2 000 左右的烧蚀隔热,烧蚀性能与模压、斜缠高硅/酚醛相同
MYDGP	40 ×17	1.70	高硅氧短切纤维与酚醛树脂混合,晾置,在热压机上加温加热固化成型,成型工艺简单,但固化成型需要较高压力,成型模具要求高,适合小尺寸制品成型	烧蚀性能良好,适合 2 000 左右的烧蚀隔热,但抗侵蚀和剥蚀能力差,力学性能低,烧蚀时易产生裂纹,使用可靠性较低
XCGGP	40 ×17.5	1.70	高硅氧布与酚醛树脂预浸烘干,裁剪,用缠绕机将预浸料在模具上缠绕,液压釜真空压力固化成型,适合轴对称回转制品成型	有较好的烧蚀和抗剥蚀能力,适合 2 000 左右的烧蚀隔热环境,环向强度较高,轴向强度低
3DCC	40 ×15	1.90	碳纤维编织成三向正交织物,多次高温高压沥青浸渍、碳化而成	适合 3 000 以上烧蚀隔热,拉伸强度高,断裂应变小,热导率大

## 4 试验结果与分析

### 4.1 不同材料的烧蚀侵蚀性能

表 2 给出了 2.5DQP、XCGGP、MYDGP、3DCC 四种材料的烧蚀侵蚀试验结果。

表 2 四种材料的烧蚀侵蚀结果

Tab.2 Ablative erosion properties of four materials

材料类型	气流速度 /m s <sup>-1</sup>	粒子类型	粒子含量 /%	烧蚀侵蚀速率/mm s <sup>-1</sup>
2.5DQP	1 000	200 目氧化铝	7	0.84
XCGGP	1 000	200 目氧化铝	7	0.783
MYDGP	1 000	200 目氧化铝	7	0.829
3DCC	1 000	200 目氧化铝	11	3.258
2.5DQP	1 000	200 目氧化铝	11	3.034

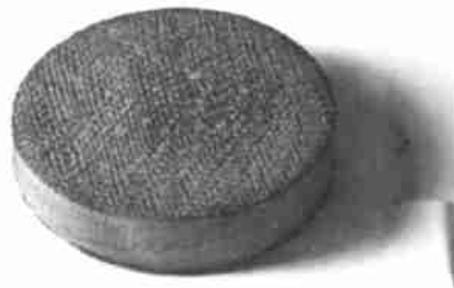
从表 2 的 2.5DQP、XCGGP、MYDGP(氧化铝粒子含量为 7%)的烧蚀侵蚀数据可见,在相同试验条件下,2.5DQP、XCGGP、MYDGP 三种材料的烧蚀侵蚀速率基本一致,图 1 所示为这三种材料烧蚀侵蚀后的形貌,从图中可见,试验后材料的烧蚀侵蚀表面基本上为原始材料,未见有高硅/酚醛材料烧蚀熔融现象,尤其是 MYDGP 材料,它的烧蚀侵蚀表面基本上呈力学破坏特征,说明在本试验条件下,粒子侵蚀后退率占材料烧蚀侵蚀速率的绝大部分,粒子侵蚀占主导地位。

在本试验条件的热流情况下,3DCC 的线烧蚀率应该是非常小的,但加入 11%氧化铝粒子后,其烧蚀率

也达到 3.258 mm/s,比相同试验条件下 2.5DQP 的烧蚀侵蚀速率还要大,从 3DCC 试样试验后的照片可见(图 2),其表面主要是粒子侵蚀所引起,这同样说明在加粒子的烧蚀条件下,对 3DCC 这样的高性能防热材料来讲,粒子侵蚀效应起主要作用。



(a) 2.5DQP 试样烧蚀侵蚀后的形貌



(b) XCGGP 试样烧蚀侵蚀后形貌



(c) MYDQP 试样烧蚀侵蚀后的形貌

图 1 2.5DQP、XCGGP、MYDGP 材料烧蚀侵蚀形貌

Fig. 1 Samples surfaces after test

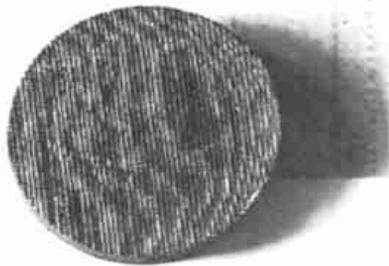


图 2 3DCC(11%氧化铝粒子)烧蚀侵蚀后形貌

Fig. 2 3DCC surface after test

#### 4.2 不同粒子含量对材料烧蚀侵蚀速率的影响

表 3 所给出的是不同氧化铝粒子含量情况下, 2.5DQP 的烧蚀侵蚀试验结果。

表 3 不同氧化铝粒子含量对 2.5DQP 烧蚀侵蚀速率影响

Tab.3 Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle content on ablative erosion rate of 2.5DQP

氧化铝含量/ %	烧蚀侵蚀速率/ $\text{mm s}^{-1}$
0	0.175
7	0.84
11	3.034

从表 3 可以看出,氧化铝粒子含量对材料的烧蚀侵蚀速率有很大影响,可以认为在该试验条件下, 2.5DQP 材料的烧蚀侵蚀速率随粒子含量的增加而增加,而且烧蚀侵蚀速率的增加速率远大于粒子的增加速率,呈非线性关系。

#### 4.3 燃气流速度对烧蚀及烧蚀侵蚀的影响

表 4 给出了不同燃气流速度与 2.5DQP 材料的烧蚀、烧蚀侵蚀速率的试验结果。

表 4 不同燃气流速度与 2.5DQP 材料的烧蚀、烧蚀侵蚀速率的关系

Tab.4 Effect of air-arc plasma and particle velocity on ablative and ablative erosion rate of 2.5DQP

气流速度 / $\text{m s}^{-1}$	烧蚀速率 / $\text{mm s}^{-1}$	烧蚀侵蚀速率/ $\text{mm s}^{-1}$ (7%氧化铝)
1 000	0.175	0.84
1 700	0.65	8.0

从表中的数据可见,烧蚀时的气流速度对材料的烧蚀侵蚀速率有很大影响。氧化铝粒子对材料的侵蚀时,粒子速度是一个关键因素,材料的烧蚀侵蚀速率和粒子速度呈非线性关系,材料的烧蚀侵蚀速率的增加率远大于粒子速度的增加率。

#### 4.4 粒子种类对 2.5DQP 材料烧蚀侵蚀影响

表 5 为 1 000  $\text{m/s}$  气流速度、11% 粒子含量试验条件下,不同粒子对 2.5DQP 材料烧蚀侵蚀试验结果。

表 5 不同粒子对 2.5DQP 材料烧蚀侵蚀试验结果

Tab.5 Effect of different kinds of particles on ablative erosion rate of 2.5DQP

粒子类型	烧蚀侵蚀速率/ $\text{mm s}^{-1}$
玻璃	1.40
石墨	1.96
氧化铝	3.034

从表 5 的 2.5DQP 烧蚀侵蚀速率可见,材料烧蚀侵蚀时,粒子的种类对材料的烧蚀侵蚀速率也有较大影响。在试验条件下,玻璃粒子的侵蚀速率最小,石墨粒子的侵蚀速率其次,氧化铝的侵蚀速率最大。这主要和粒子在试验状态下的物理状态有关,玻璃粒子的软化点为 600、氧化铝的熔点为 2 050、石墨的升华温度在 3 000 以上,而且这三种粒子中以氧化铝粒子的硬度最大,所以在 1 000 的气流温度下,相同粒子含量情况下,玻璃粒子较软,其对材料的侵蚀较小,氧化铝粒子的硬度最大,对材料的侵蚀速率最大,而且石墨粒子的硬度介于玻璃

粒子和氧化铝粒子之间,它对材料的侵蚀速率也介于这两者之间。

#### 4.5 2.5DQP 在实际使用中的烧蚀侵蚀情况

在实际使用过程中,由于氧化铝粒子温度高,粒子软,其对材料的侵蚀效应比试验结果要小,图3为2.5DQP材料在固体火箭发动机导流器防热结构中一次使用后的照片,一次发射的烧蚀侵蚀量约为0.5 mm,烧蚀表面平整,驻点区表面纤维熔融,导流器大面积树脂碳化并有一定量的纤维熔融,导流帽表面基本上没有侵蚀的迹象。

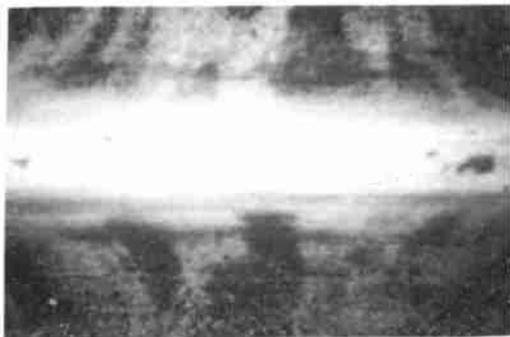


图3 固体火箭发动机导流器防热帽一次使用后的形貌

Fig. 3 Surface of 2.5DQP thermal protection structure for solid rocket motor after launch

## 5 结论

(1) 2.5DQP、XCGGP、MYDGP 三种材料在氧化铝粒子含量7%条件下的烧蚀侵蚀速率基本一致。

(2) 粒子含量和气流速率对材料烧蚀侵蚀速率的影响很大,材料的烧蚀侵蚀速率随粒子含量、气流速率的增加而增加。

(3) 在燃气流中含11%的200目氧化铝粒子、气流速率1000 m/s、气体总温3450 K、压力1 MPa的条件下,2.5DQP和3DCC的烧蚀侵蚀速率值分别为3.034 mm/s和3.258 mm/s,而同样等离子热流不加粒子条件下的2.5DQP的烧蚀速率只有0.17 mm/s,说明在加入11%氧化铝粒子条件下,粒子侵蚀是材料烧蚀侵蚀的主要因素。

(4) 由于试验时氧化铝粒子温度低于发动机产生的氧化铝粒子温度,因此试验的氧化铝粒子的硬度大,对材料的侵蚀率要大于发动机产生的氧化铝粒子的侵蚀率,固体火箭发动机导流器防热帽在实际使用后的烧蚀侵蚀表面状态证实了这个结论。

### 参考文献

- 1 郭正主编. 宇航复合材料. 宇航出版社,1999:121~136
- 2 史可顺. 耐热材料侵蚀试验结果和形貌分析. 宇航材料工艺,1987;(2):4~20

## 欢迎订阅 2002 年《化工新型材料》

《化工新型材料》创刊于1973年,系中国化工信息中心主办的化工科技类刊物。

《化工新型材料》主要报道国内外新近发展和正在开发的具有某些优异性能或特种功能的先进化工材料的研究开发、技术创新、生产制造、加工应用、市场动向及产品发展趋势。

《化工新型材料》为月刊,大16开。刊号:ISSN1006-3536/CN11-2357/TQ,国内定价:10元/本,120元/年。

邮发代号:82-816,全国各地邮局均可订阅或通过编辑部直接订阅。

地址:北京安定门外小关街53号

邮编:100029

电话:(010)64437113 (010)64444093

传真:(010)64444086

开户行:北京农业银行亚运村支行

户名:北京中化信深达信息技术有限责任公司

帐号:8010258-37

宇航材料工艺 2001年 第6期

— 13 —