

碳/酚醛复合材料烧蚀性能的实验研究

刘德英 王岳广 张友华 杨汝森

(北京空气动力研究所,北京 100074)

摘 要 总结了电弧加热器湍流导管试验装置上对碳/酚醛复合材料的烧蚀试验结果,利用多元线性回归方法,拟合出烧蚀材料的有效烧蚀焓与冷壁热流密度、壁面压力的关联式。在一定热流、压力范围内可以很方便地计算出碳/酚醛复合材料的有效烧蚀焓和质量烧蚀率。

关键词 电弧加热器,湍流导管,有效烧蚀焓,质量烧蚀率

Experimental Study on Ablative Properties of Carbon/phenolic Composite

Liu Deying Wang Yueguang Zhang Youhua Yang Rusen

(Beijing Institute of Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract The ablation test results of carbon/phenolic composites tested in turbulent duct connected to arc heater are generalized. The multiple linear regression method is used to fit out a correlation, which is the tie-in equation about effective enthalpy of ablation of composite with the cooled-wall heat flux and wall static pressure. With this correlation, the effective enthalpy of ablation and mass loss rate of carbon/phenolic composites can be calculated conveniently in a certain range of heat rate and wall static pressure.

Key words Arc heater, Turbulent duct, Effective enthalpy of ablation, Mass loss rate

1 问题的提出

碳/酚醛复合材料是继高硅氧/酚醛复合材料之后又一代新型烧蚀耐热材料。与高硅氧/酚醛复合材料相比,由于碳纤维在高温下不熔化、强度高、有效烧蚀焓大,可用于飞行器头部作再入耐热材料。碳/酚醛复合材料可使弹头在再入过程中保持较完整的气动外形,还可兼具耐热和结构的双重作用。较好地解决了高热流环境下的热防护问题。

碳/酚醛复合材料具有石墨或碳/碳材料的某些烧蚀特性,而其工艺和一般增强塑料相近,可沿用模压、层压和缠绕等工艺。

碳/酚醛复合耐热材料的研制成功,有赖于新型碳布和酚醛树脂的开发,以及复合工艺的研究,这种新型耐热材料主要用于弹头头部锥面耐热,在大推

力固体发动机喷管上也广为应用,是当代一种先进的耐热材料。

1.1 烧蚀过程^[1,2]

碳/酚醛复合材料的烧蚀过程兼有升华效应和热分解反应,并综合了高硅氧/酚醛和碳/碳材料的某些特性,其基本过程如下。

1.1.1 材料本身的热容吸热

气动加热初期,材料依靠自身的热容吸热升温,由于碳纤维不熔化,可升到较高的温度,但碳/酚醛的热导率大于高硅氧/酚醛,因而向内层传递的热能也较多,这就导致烧蚀过程中碳层加厚。

1.1.2 树脂的热分解及碳层的形成

当材料温度上升到树脂的热分解温度时,树脂开始热分解吸热,热解气体向外逸出并带走热量,同

收稿日期:2003-04-18;修回日期:2003-08-08

刘德英,1951年出生,高级工程师,主要从事气动热地面研究工作

时生成热解层和碳层,这一现象和高硅氧/酚醛相似,不同的是碳/酚醛在高温下可生成较厚的坚硬碳层,碳层总质量可达到原防热层材料质量的85%,由于表面温度高,碳层具有石墨化的倾向,这就使碳/酚醛复合材料在一定程度上兼有石墨或碳/碳材料的烧蚀特性。

1.1.3 碳层表面的化学反应、升华和热辐射

防热层截面由表向里可分四层:(1)最外层,直接承受气动热,温度约为2500~1600,生成稳定的碳化层,具有石墨化倾向,气孔率高;(2)次外层,也为稳定的碳化层,温度为1600~1000,完全热解碳化但不出现石墨化倾向;(3)热解层,包括部分不稳定碳层,温度从1000~650;(4)最后为原始材料层,基本上未发生化学变化。

表面层在附面层中氧的作用下发生化学反应而放出热量与碳/碳材料近似。由于表面温度很高,大量热量以热辐射的形式放出,同时发生部分碳分子的升华吸热。

1.1.4 热解气体析出和剥蚀现象

随着烧蚀过程的进行,交界处不断产生的热解气体产物穿过碳层把大量的热量带入附面层,并阻止附面层热量向内传递,但是这种热分解气体也会导致碳层破碎而随气流流失,即“机械剥蚀”。所以热解气体在防热中的作用具有双重性,过多的气体产物会导致严重的机械剥蚀。对于弹头锥面防热层材料须注意碳布层取向与气流的关系、碳纤维的抗氧化性能、树脂的热解产物组分以及成碳性能,这些都会影响到剥蚀现象。所以如何选择原材料和工艺,对防止或减轻机械剥蚀,保持防热层的结构完整性,提高耐烧蚀性能是至关重要的。

1.2 成型工艺

碳/酚醛材料制备工艺与高硅氧/酚醛材料相似,但由于碳/酚醛材料昂贵,其工艺相对要求较高。制造工艺有两种:模压工艺和缠绕工艺。

1.2.1 模压工艺

模压工艺包括碎胶布和预浸料纤维模压,较多地应用于弹头防热层的天线窗加强框、后端头体、固体火箭发动机喉衬等部位。由于碳纤维易折断,成型压力不宜过高,以免损伤纤维,造成制品性能下降。

1.2.2 缠绕工艺

缠绕工艺是碳/酚醛防热层材料主要制造工艺,

常用有两种:重叠缠绕和倾斜缠绕。重叠缠绕主要用于发动机喷管喉衬;倾斜缠绕主要用于导弹弹头防热层。

本文研究的碳/酚醛材料采用倾斜缠绕工艺。作为热防护的斜缠碳/酚醛材料,有必要在已积累大量烧蚀性能的数据基础上,对其烧蚀性能作出定量的描述。

2 斜缠碳/酚醛材料烧蚀性能的实验分析

烧蚀材料在某一特定的热环境下,有一质量烧蚀速率。我们引入有效烧蚀焓来表征材料的烧蚀特性。烧蚀材料有效烧蚀焓定义为在烧蚀温度下,材料表面无烧蚀的热流密度与材料质量烧蚀率之比^[3]:

$$H_{\text{eff}} = \frac{q_{e,cw}}{\dot{m}_t} \left(1 - \frac{H_w}{H_0} \right) \quad (1)$$

式中, H_{eff} 为材料有效烧蚀焓; $q_{e,cw}$ 为冷壁热流密度; \dot{m}_t 为材料质量烧蚀率; H_w 为材料表面烧蚀温度下的焓; H_0 为气流总焓。

上述定义忽略了材料表面辐射的能量。如果考虑表面辐射的能量,有效烧蚀焓就写成

$$H_{\text{eff}} = \frac{q_{e,cw}}{\dot{m}_t} \left(1 - \frac{H_w}{H_0} \right) \frac{1}{1 - \frac{q_r}{q_{e,cw}}} \quad (2)$$

由于在烧蚀过程中材料表面辐射系数很小,使得

$$\frac{1}{1 - \frac{q_r}{q_{e,cw}}} \approx 1。$$

在导管内,表面温度没有测量,所以我们定义冷壁热流密度下的有效烧蚀焓,即令 $H_w = 0$,则冷壁热流密度下的有效烧蚀焓 $H_{\text{eff},cw}$ 变成下面的公式:

$$H_{\text{eff},cw} = \frac{q_{e,cw}}{\dot{m}_t} \quad (3)$$

十多年以来,在电弧加热器超声速和亚声速导管上共作了七个工况的碳/酚醛材料的烧蚀试验,积累了大量的试验数据。

20世纪80年代,我们作了气流 $Ma = 1.2$,模型尺寸20 mm × 100 mm(= 5 mm ~ 10 mm)的超声速导管烧蚀试验(简称小导管),共作了三个工况,试验参数和烧蚀试验结果见表1。

20世纪90年代中期,我们作了 $Ma = 2$,模型尺寸50 mm × 85(90) mm(= 5 mm ~ 10 mm)的超声速导管烧蚀试验(简称大导管),共作了二个工况,试验参数和烧蚀试验结果见表1。

90年代后期,我们又作了气流 $Ma = 0.8$ 的大尺寸亚声速导管试验,模型尺寸 $120\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ($d = 5\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$),试验参数和烧蚀试验结果见表1。

表1 试验参数和试验结果

Tab.1 Test parameters and results

Ma	冷壁热流密度 $q_{e,cw}$	气流总焓 H_0	壁面压力 P_e	质量烧蚀率 \dot{m}_t
	$/\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$	$/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$/\text{MPa}$	$/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
1.2	7.26	14.00	0.16	0.42
	10.80	16.00	0.24	0.49
	16.20	17.00	0.40	0.59
2.0	12.00	16.00	0.17	0.45
	20.00	18.00	0.29	0.64
0.8	3.60	7.10	0.95	0.29
	6.28	6.26	1.20	0.36

试验结果仅仅是七种状态的结果。如果将有效烧蚀焓整理成它与冷壁热流密度和壁面压力的关联式,就可以将试验结果推广应用。

Nevin. K. H 和 Carral. F. C 曾将有效烧蚀焓表达成气流冷壁热流密度和压力 (P_e) 的关系式^[4]:

$$H_{\text{eff},cw} = A \cdot q_{e,cw}^b \cdot P_e^c \quad (4)$$

我们同样用此种方法,用已知的七组参数,求出碳/酚醛材料烧蚀性能的关联式。对(4)式两边求对数,得到

$$\ln H_{\text{eff},cw} = \ln A + b \ln q_{e,cw} + c \ln P_e \quad (5)$$

这是一个线性关系式,有两个自变量 $q_{e,cw}$ 和 P_e ,三个未知数 A 、 b 、 c 。根据七个状态的试验数据,利用多元线性回归方法^[5],得到如下方程:

$$\ln H_{\text{eff},cw} = 1.819 + 0.554 q_{e,cw} + 0.032 P_e \quad (6)$$

将线性方程转化成指数方程:

$$H_{\text{eff},cw} = 6.168 q_{e,cw}^{0.554} \cdot P_e^{0.032} \quad (7)$$

表2列出了有效烧蚀焓的试验结果与相关表达式(7)的计算结果,两者的平均偏差为1.1%。

表2 试验结果和计算结果比较

Tab.2 Comparison between results of test and calculation

试验结果 $H_{\text{eff},cw}$	计算结果 $H_{\text{eff},cw}$
$/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
17.29	17.44
22.04	22.02
27.46	28.03
23.53	23.08
31.25	31.17
12.41	12.52
17.44	17.17

3 结论

通过电弧加热器导管试验技术,得到了新型碳/酚醛复合材料的有效烧蚀焓的相关表达式(7)式,由(7)式可见,碳/酚醛材料有效烧蚀焓主要受冷壁热流密度影响,受压力影响不大。

电弧加热器导管试验产生的高温流场,特别是湍流导管,更接近于飞行条件下的湍流烧蚀。湍流导管试验工况的参数测量方法与常规电弧加热器流场校测的方法相同,即气流总焓采用平衡音速流法,冷壁热流密度采用水卡量热计,壁面压力测量采用压力传感器,质量烧蚀率采用称重法。

本文得到的碳/酚醛复合材料的有效烧蚀焓 $H_{\text{eff},cw}$ 适用于冷壁热流密度 $2.6\text{ MW/m}^2 \sim 23\text{ MW/m}^2$,壁面压力在 $0.15\text{ MPa} \sim 1.35\text{ MPa}$ 范围之内,总比焓范围为 $6\text{ MJ/kg} \sim 20\text{ MJ/kg}$ 。在防热设计中利用表达式(7)计算碳/酚醛材料的烧蚀性能,既简洁又可靠。

参考文献

- 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护. 国防工业出版社,2003:67~92
- 任思根. 实验空气动力学. 宇航出版社,1996:321~333
- Nevin K H, Carrol F C. Feasibility of standard evaluation procedures for ablation materials. NASA CR - 379, 1966:5~17
- Nevin K H, Carrol F C. Comparative evaluation of ablating materials in arc plasma jets. NASA CR - 1207, 1970:4~28
- 吴翎,李永乐,胡庆军. 应用数理统计. 国防科技大学出版社,1995:135~196

(编辑 马晓艳)