

防热复合材料抗粒子侵蚀特性研究

王俊山

(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 研究了含钨 C/C 复合材料、细编穿刺 C/C 复合材料等防热材料抗粒子侵蚀性能及其形貌特征。针对试验结果,探讨了目前侵蚀性能试验存在的问题。指出不同种类的防热复合材料在不同试验条件下表现出不同的抗粒子侵蚀机理和形貌特征,以侵蚀系数 C_n 值表征不同防热材料抗粒子侵蚀能力的大小具有不直观性。

关键词 C/C 复合材料,防热材料,粒子侵蚀性能

Particle Erosion Performance of Thermal Shield Composite Materials

Wang Junshan

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract This paper briefly investigates the particle erosion performance of carbon/carbon thermal shield composites and their microstructure after testing. The problems of particle erosion ground - test have been discussed. It points out that different kinds of thermal shield composites have different particle erosion performance and mechanism. It is not accurate if C_n is as a token of particle erosion performance.

Key words Carbon/Carbon composites, Thermal shield composites, Particle erosion performance.

1 前言

航天器在再入大气层过程中除了要经受近万度的高温和很高压下的烧蚀外,还要经受空气中的雨滴、冰晶、尘埃等粒子的高速撞击,因而航天器上所选用的防热材料除了要求有很高的力学性能、抗烧蚀性能外,还要求有很高的抗粒子侵蚀性能来保证航天器能在恶劣气候条件下安全再入大气层。因而为了考核防热材料的抗粒子侵蚀性能,为材料研究和航天器设计提供依据,必须对航天器防热材料的侵蚀性能进行研究。

在国内,可进行防热材料抗粒子侵蚀性能试验的方法有很多种,如:(1)固体火箭发动机烧蚀/侵蚀

试验^[1];(2)固定靶材,由二级轻气炮发射液体粒子或固体粒子的单粒子碰撞侵蚀试验^[2,3];(3)在大气层中进行的由小型火箭发射的自由飞侵蚀试验;(4)固定雨屏,由二级轻气炮发射模型的弹道靶侵蚀试验;(5)电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀试验等。从试验条件对真实环境的模拟程度和试验经费等方面考虑,目前国内大量选用的一般为后两种实验方法,即弹道靶侵蚀试验和电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀试验。本文对 C/C 材料、含钨 C/C 材料等防热复合材料的抗粒子侵蚀性能进行了初步研究,并对结果进行了分析和讨论。

2 试验

收稿日期:2000 - 05 - 18

王俊山,1965 年出生,研究员,主要从事 C/C 复合材料的研究工作

2.1 材料

试验用材料为细编穿刺 C/C 材料和 z 向纤维中含有不同根数钨丝的含钨 C/C 材料。

2.2 试验项目及设备

电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀试验所用设备为 FD-04F 长分段电弧加热器。粒子为石墨粒子,粒子动能总量 E_p 为 180 J/cm^2 。

弹道靶侵蚀试验用设备为 50 mm 口径二级轻气炮,粒子为由水滴组成的雨屏。对试验后的模型用 SEM-535 扫描电镜和 MM-6 大型卧式金相显微镜进行微观结构观察与分析。

3 试验结果与讨论

3.1 材料电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀性能

含钨 C/C 材料与细编穿刺 C/C 材料电弧加热器加粒子烧蚀/侵蚀试验结果列于表 1。

表 1 材料烧蚀/侵蚀性能*

Tab.1 Properties of air-arc multiple-particle erosion test

材料编号	驻点侵蚀率 $V_{1z}/\text{mm s}^{-1}$	驻点侵蚀率 $V_{1xy}/\text{mm s}^{-1}$	侵蚀系数 $C_n/\text{J g}^{-1}$	比值 1	比值 2
W-11	2.03	-	379	1.57	-
W-12	2.20	-	345	1.45	-
W-13	2.27	-	321	1.40	-
W-14	2.43	-	283	1.31	-
C-11	3.19	-	292	-	-
W-21	3.16	3.44	262	1.19	1.24
W-22	3.05	3.26	277	1.24	1.32
W-23	3.34	3.54	266	1.13	1.21
C-21	3.78	4.29	277	-	-

* W-11、W-12、W-13、W-14、W-21、W-22、W-23 为含钨的 C/C 材料,C-11、C-21 为 C/C 材料。比值 1 为 C/C 材料与含钨 C/C 材料的 V_{1z} 的比值;比值 2 为 C/C 材料与含钨 C/C 材料的 V_{1xy} 的比值。

由表 1 可见,以驻点侵蚀率计算,含钨 C/C 材料比细编穿刺 C/C 材料驻点侵蚀率明显偏低,抗粒子侵蚀性能明显偏高。以侵蚀系数计算,两种防热材料抗粒子侵蚀性能基本相当。两种考核方法上结果的差异,主要是由于侵蚀系数 C_n 的概念是侵蚀掉单位质量的目标所消耗的能量,由于含钨 C/C 材料密度较大,约 2.8 g/cm^3 ,较细编穿刺 C/C 材料密度约 2.0 g/cm^3 高出很多,故含钨 C/C 材料与细编宇航材料工艺 2000 年 第 5 期

穿刺 C/C 材料 C_n 值的差距较驻点侵蚀率差距不一致。这也说明对于一些对烧蚀/侵蚀外形和烧蚀/侵蚀量比较关心的航天器用防热材料,单独以 C_n 值考核材料的抗粒子侵蚀性能结果不直观,容易造成误解,尤其在材料密度存在显著差异情况下更是如此。

宏观观察结果表明(图 1),两种防热材料试验后,其 z 向纤维束明显高于 xy 向碳布,说明 z 向纤维束抗粒子侵蚀能力高于 xy 向碳布。两种模型表面都没有大的凹坑。

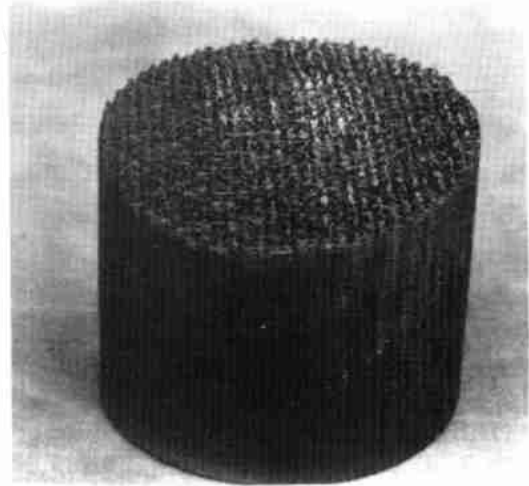


图 1 电弧加热器加粒子试验后模型

Fig. 1 Model photo after air-arc multiple particle erosion test

微观观察结果表明,高速粒子撞击在 z 向纤维表面,z 向碳纤维束中有可观察到的浅坑。整个 z 向纤维束中的碳纤维端面比较钝,有明显烧蚀痕迹(图 2)。与单粒子侵蚀结果不同^[3],在多粒子侵蚀条件下,未观察到 xy 向纤维发生压折,挤压在一起表层致密化的现象。多粒子撞击在 xy 向碳布上,碳布发生断裂,出现粒子撞击凹坑,凹坑底部露出碳布上,有的有断裂现象,但裂纹没有继续向深层扩展。高速粒子撞击在由钨丝转变来的 WC 丝上,表面未见撞击凹坑,只是发生 WC 晶粒倒伏(图 3),这种倒伏现象十分普遍,它能吸收一部分粒子撞击能量。

在烧蚀/侵蚀条件下,模型表面温度约 2750 K ,低于 WC 熔化温度(约 2600),但此温度下 WC 韧性急剧增加,已由脆性材料变为韧性材料。在烧蚀/侵蚀条件下,WC 丝的韧性使其具有非常优异的抗粒子侵蚀特性。因此含钨 C/C 材料的抗粒子侵蚀

性能高于细编穿刺 C/C 材料性能。

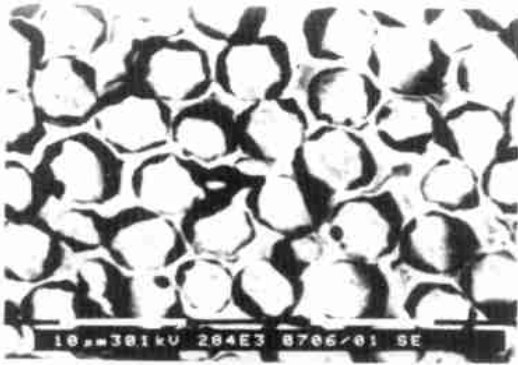


图 2 试验后 z 向碳纤维形貌

Fig. 2 z - D carbon fibers after multiple-particle erosion test



图 3 电弧加热器加粒子试验后 WC 形貌

Fig. 3 WC fiber after air-arc multiple-particle erosion test

3.2 材料的弹道靶试验侵蚀性能

弹道靶侵蚀试验结果表明,含钨 C/C 材料的 C_n 值比细编穿刺 C/C 材料低约 20%,因此,试验单位认为,含钨 C/C 材料抗粒子侵蚀性能不如细编穿刺 C/C 材料。笔者认为,考虑到两种材料密度相差约 25%,若以驻点侵蚀率计算,两者抗粒子侵蚀性能应该相当。即使如此,该试验结果与电弧加热器加粒子试验结果有差异。

宏观观察结果表明,弹道靶侵蚀试验后,模型表面存在十多处直径约 3 mm ~ 5 mm,深约 2 mm ~ 4 mm 凹坑(图 4) 微观观察结果表明,无论是凹坑的底部还是边缘,z 向纤维与周围 xy 向碳布基本平齐,没有电弧加热器加粒子试验后模型表面突出的 z 向纤维束,z 向纤维束中的碳纤维断口很平齐,属于折断,没有烧蚀痕迹,WC 丝撞击后也发生脆断,被撞击的 WC 丝晶体有疏散现象(图 5)。



图 4 弹道靶试验后模型形貌

Fig. 4 Model photo after ballistic target test



图 5 弹道靶试验后 WC 丝形貌

Fig. 5 WC fiber after ballistic target test

弹道靶侵蚀试验结果与电弧加热器加粒子侵蚀试验结果有差异,与两者试验条件差距大有关。前者粒子为液态水滴,粒径大,速度高,作用时间短(毫秒级);后者为石墨粒子,粒径小,速度低,试验时间长(约 4s)。前者由于撞击时间短,模型表面温升很小,而后者是热场试验,模型温度很高。在弹道靶侵蚀试验中,由于模型温度低,WC 仍为脆性材料,在粒子撞击下发生脆断,没有热场试验时的 WC 晶体倒伏等吸收能量过程。试验条件的巨大差异造成材料抗粒子侵蚀机理的明显不同,因而试验后模型形貌及试验结果也产生了很大差异。

3.3 问题讨论

从上述试验结果可知,不同的试验方法得出的两种防热材料抗粒子侵蚀能力大小有明显差异,这对材料侵蚀性能数据的选取、材料改进、航天器结构设计等带来很大困难。

抗粒子侵蚀性能试验不属于常规试验,不同试验方法的试验参数差异很大,因而侵蚀机理及试验结果也存在很大差异。以前国内有关单位对不同侵

蚀试验后耐热材料抗粒子侵蚀能力排序如下:

固体发动机试验结果为三向 C/C 材料优于高硅氧/酚醛和碳/石英材料^[1];

液滴粒子碰撞试验结果为高硅氧/酚醛优于碳/石英优于三向 C/C 材料^[2];

弹道靶侵蚀试验结果高硅氧/酚醛优于细编穿刺 C/C 材料优于碳/石英优于含钨 C/C 材料;

电弧加热器加粒子侵蚀试验结果为碳/石英优于三向 C/C 材料优于高硅氧/酚醛。

以上排序上的混乱状态,来源于不同试验条件下材料表现出的响应机理存在明显差别。以电弧加热器加粒子侵蚀试验为例,在试验过程中发现,碳/石英表面始终覆盖有一层 SiO₂ 液态层,该液态层在抵抗粒子碰撞方面起了十分重要的作用,在没有液态层的地方则出现相当严重的侵蚀现象。高硅氧/酚醛中虽然也有 SiO₂ 成分,但由于该材料隔热性能相当好,模型表面温升很快, SiO₂ 液态层的粘度很小,易于流失,而将强度很低的碳化层暴露在外,经不住高速粒子的撞击,表现出较差的抗粒子侵蚀能力。在固体发动机粒子侵蚀试验中,碳/石英材料中的 SiO₂ 液态层粘度很小,易于流失,也表现出较差的抗粒子侵蚀能力。

含钨 C/C 材料抗粒子侵蚀试验也有上述问题,即冷场和热场试验条件下 WC 表现出不同的侵蚀机理。因此,对于想选用含钨 C/C 等耐热材料的航天器,必须根据航天器使用环境,选择与之接近的试验条件进行粒子侵蚀试验。

4 结论

(1) 含钨 C/C 材料和细编穿刺 C/C 材料等耐热复合材料在不同试验条件下表现出不同的抗粒子侵蚀机理和形貌特征。

(2) 以侵蚀系数 C_n 值表征不同耐热材料抗粒子侵蚀能力的大小具有不直观性。

(3) 考察耐热材料的抗粒子侵蚀性能,应尽可能选用与航天器使用环境相近的试验条件和试验设备,同时分析耐热材料抗侵蚀机理与真实环境是否存在区别。

参考文献

- 1 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
- 2 史可顺.耐热材料受液滴碰撞时的侵蚀破坏.宇航材料工艺,1987;(6):15~19
- 3 史可顺.碳/碳复合材料的单粒子侵蚀破坏.宇航材料工艺,1984;(4):27~30

《上海有色金属》2001 年征订启事

《上海有色金属》是经国家科委批准,由上海市有色金属学会和上海有色金属(集团)有限公司联合主办的有色金属科学技术刊物,国内外公开发行。本刊以华东地区钢材产量占全国 35%、铜铝加工材产量占全国 45% 的金属材料加工业为依托,以金属材料深加工及新材料信息为重点,主要报道金属材料行业的现状、动态和市场趋势,刊登国内外金属材料各学科具有创新性的学术论文和科研成果,报道金属材料科技发展的最新动向和综述评论。本刊设有专论、述评、学术讲座、考察报告、科技简讯、行业信息、统计资料等栏目。《上海有色金属》读者对象为有色金属、钢铁、机械、化工、机电、汽车、仪表、轻工、建材、通讯、航空航天、能源、环保等行业的工矿企业、科研设计院所、高等院校和经营管理单位的有关人员。

《上海有色金属》为季刊,16 开,每期 48 页。每期定价 8.00 元,全年 32.00 元。国内单位或个人订阅请直接向上海市有色金属学会索取订单,办理订阅手续;也可向全国非邮发报刊联订服务部(天津市陈塘庄岩峰路 5 号,邮编:300220)订阅。国外读者请向中国出版对外贸易总公司(北京 782 信箱)预订,本刊国外发行代号:DK31013。国内统一刊号:CN31-11646/TF,国际标准刊号:ISSN1005-2046,国际刊名代码:CODEN SYIIE X。逾期漏订者直接向《上海有色金属》编辑部办理补订手续。

《上海有色金属》编辑部地址:上海市中州路 101 号 701 室

邮编:200080,电话/传真:021-33010632

账号:022139-14413474 工行虹口武分处

电子信箱:ysjxh@online.sh.cn 网站: <http://www.snm.com.cn>

《上海有色金属》——金属材料深加工及新材料的学科指南

金属材料行业现状、动态和市场趋势的信息集锦

欢迎订阅《上海有色金属》