

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.007

某火箭发动机喷管扩散段烧蚀材料选材

李大勇¹, 高延杰¹, 罗长宏¹, 张克石², 魏化震¹, 孔国强¹

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 国营洛阳丹城无线电厂, 河南洛阳 471000)

摘要:为解决某总体单位提出的某战术导弹火箭发动机喷管扩散段结构及热环境工况要求,进行了扩散段用烧蚀材料试验对比筛选。对短切碳纤维增强酚醛树脂复合材料预浸料和高硅氧玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料预浸料进行研究,分析不同材料的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度和线烧蚀率,制备产品样件进行水压爆破试验,分析不同纤维长度以及不同纤维种类对产品抗压强度的影响,并通过发动机地面静试研究扩散段烧蚀材料适用情况。结果表明,虽然酚醛树脂/短切碳纤维复合材料的力学性能及耐烧蚀性能均优于酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料,但在发动机温度低于2 000℃、固体粒子含量较多且燃气流速较大的部位,酚醛树脂/短切碳纤维复合材料的耐冲刷性能较差,无法满足使用要求,酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料耐烧蚀及抗冲刷性能更优异,可满足使用要求。进一步探讨了在特定热、力环境下不同纤维增强体烧蚀材料的热防护机理机制,通过发动机试验进行了选材方案验证,为特定热环境烧蚀材料选用提供了理论及应用依据。

关键词: 碳纤维; 高硅氧玻璃纤维; 喷管扩散段; 烧蚀; 机理

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0037-07

Ablative Material Selection in Diffusion Section of a Rocket Engine Nozzle

Li Dayong¹, Gao Yanjie¹, Luo Changhong¹, Zhang Keshi², Wei Huazhen¹, Kong Guoqiang¹

(1. Shandong Nonmetallic Materials Institute, Jinan 250031, China;

2. State-owned Luoyang Dancheng Radio Power Plant, Luoyang 471000, China)

Abstract : To solve the requirement of structure and thermal environment requirements of the nozzle diffusion section of a tactical missile rocket engine proposed by the overall unit, the ablative material test for the diffusion section was compared and screened. The short-cut carbon fiber reinforced phenolic resin prepreg and high-silica glass fiber reinforced phenolic resin prepreg were selected for research, and the tensile strength, compressive strength, bending strength and line ablation rate of different materials were analyzed. The product samples were prepared for water pressure blasting test, and the effects of different fiber lengths and different fiber types on the compressive strength of the products were analyzed. The application of the ablation material in the diffusion section was studied by static test of the engine on the ground. The results show that although the mechanical properties and ablation resistance of phenolic/short cut carbon fiber materials are better than those of phenolic/filament high-silica glass fiber materials, the erosion resistance of phenolic/short cut carbon fiber materials is poor in the parts where the engine temperature is lower than 2 000℃, the solid particle content is more and the gas flow speed is larger, and the application requirements cannot be met. phenolic/filament high silica glass fiber material has better ablative resistance and erosion resistance, which can meet the requirements of use. And the thermal protection mechanism of different fiber reinforcement ablative materials in the specific thermal and mechanical environment was further discussed. The material selection scheme was verified through the engine test, which provides a basis for the selection of ablative materials in the specific thermal environment theoretical and application basis.

Keywords : carbon fiber ; high-silica glass fiber ; nozzle diffusion section ; ablation ; mechanism

扩散段是火箭发动机喷管的重要组成部分,一般通过螺纹与收敛段连接,其作用是在发动机火药

通信作者: 高延杰, 硕士, 工程师, 主要从事热防护材料研究

收稿日期: 2023-09-15

引用格式: 李大勇, 高延杰, 罗长宏, 等. 某火箭发动机喷管扩散段烧蚀材料选材[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 37-43.

Li Dayong, Gao Yanjie, Luo Changhong, et al. Ablative material selection in diffusion section of a rocket engine nozzle[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 37-43.

燃烧时,在化学能转变为推力动能的过程中形成燃气通道,提供良好的热防护,保证发动机正常工作^[1]。碳纤维及高硅氧玻璃纤维增强酚醛树脂基复合材料是目前固体火箭发动机喷管防烧蚀内衬最广泛使用的两类复合材料,特别是以短切碳纤维增强、模压工艺制备的喷管防烧蚀内衬构件,由于其材料及工艺成本低,适用于大批量生产,已在各类战术导弹发动机喷管中广泛应用^[2-4]。

针对总体单位提出的某战术导弹火箭发动机喷管扩散段研制工作要求,进行了扩散段烧蚀层选材及制备研究工作。喷管扩散段由金属环体、烧蚀层和喉衬构成,扩散段结构示意图见图1。其中,金属环体由不锈钢制备,与烧蚀层一体模压成型,喉衬由碳/碳复合材料制备。

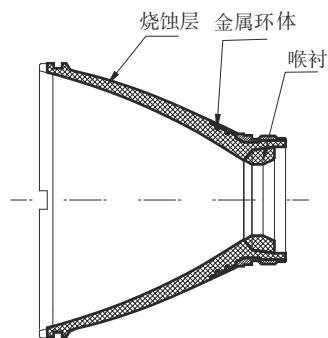


图1 扩散段结构示意图

一般情况下,发动机工作时具有较高的温度和压强,喷管收敛段和扩散段烧蚀层材料设计选用时主要考虑材料的力学性能和耐烧蚀性能。笔者选材时除研究材料的力学性能和耐烧蚀性能之外,进一步研究了耐冲刷性能对扩散段的影响,通过在该火箭发动机特定热环境下的烧蚀试验分析及对比,确定了扩散段烧蚀层材料并进行了机理分析,为该火箭发动机特定热环境烧蚀材料选用提供了理论及应用依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

不锈钢:市售;

碳/碳复合材料:西安超码科技有限公司;

酚醛树脂/短切碳纤维复合材料预浸料:WC FC-101-1,山东非金属材料研究所;

酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维复合材料预浸料:WS FC-102-1,纤维长度为30~50 mm,山东非金属材料研究所;

酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料预浸

料:WS FC-102,纤维长度为850~950 mm,山东非金属材料研究所。

1.2 仪器及设备

电热鼓风干燥箱:FXB101-3型,上海树立仪器仪表有限公司;

电子天平:JZC-6HAC型,福州科迪信息技术有限公司;

塑料液压机:45T, YTD71-45A型,天津市智杰科技有限公司;

电子万能试验机:59665969型,英国英斯特朗公司;

水压试验机:SUP-XT-160型,济南思明特科技有限公司;

烧蚀试验机:YS-iv型,中国航天科技集团44所;

塑料液压机:YT71-160型,天津市智杰科技有限公司。

1.3 试样制备

分别以WC FC-101-1预浸料、WS FC-102-1预浸料、WS FC-102预浸料作为烧蚀层材料制备扩散段样件。

用电子天平称取预浸料,放入鼓风烘箱中,每间隔5~10 min翻动预浸料一次,使其均匀受热。调整烘料时间和温度,预烘后的预浸料应不粘手、不扎手,并保证压制时没有明显胶液流出。烘料的同时打开液压机预热,待温度达到120~160℃时将预浸料放入模具,合模后加压,成型温度 $(160\pm 10)^{\circ}\text{C}$,成型压力 $(45\pm 10)\text{MPa}$,保压时间30 min。压制到规定时间后,打开液压机取出产品。

1.4 性能测试

拉伸强度按照GB/T 1447-2005测试,测试速率为5 mm/min;

弯曲强度按照GB/T 1449-2005测试,测试速率为10 mm/min;

压缩强度按照GB/T 1448-2005测试,测试速率为10 mm/min;

线烧蚀率按照GJB 323 A-1996测试。

2 结果与讨论

2.1 材料及扩散段结构强度性能分析

按相应标准测试酚醛树脂/碳纤维复合材料和酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度和线烧蚀率,对比分析不同复合

材料的力学性能和耐烧蚀性能。测试结果列于表1。由表1可见,酚醛树脂/短切碳纤维复合材料的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度最大,线烧蚀率最小;酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维复合材料和酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料的线烧蚀率基本一致,酚醛树脂/短切高硅氧复合材料的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度均最小。

表1 不同纤维增强酚醛树脂复合材料性能

项目	酚醛树脂/短切碳纤维	酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维	酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维
拉伸强度/MPa	113	56	89
压缩强度/MPa	136	114	132
弯曲强度/MPa	286	64	149
线烧蚀率/(mm·s ⁻¹)	0.002	0.083	0.088

经分析,由于碳纤维的本身强度和热解温度远高于高硅氧玻璃纤维,因此在树脂基体相同的情况下,碳纤维增强酚醛树脂复合材料的力学性能和耐烧蚀性能更优异。酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维复合材料和酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料选用的高硅氧玻璃纤维仅长度不同,因此两种复合材料的耐烧蚀性能基本一致。酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料的增强纤维为乱丝长纤维,在基体树脂固化成型后可形成连续相,因此酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料表现出更加优异的力学性能。

对发动机工作时扩散段各部位应力进行仿真计算,扩散段内压仿真部位示意图如图2所示,计算结果见表2。在扩散段喉衬部位内压(8.526 MPa)及环向拉应力(34.51 MPa)最大。燃气流通过喉衬后,扩散段内压急剧下降,扩散段出口处压力为0.135 MPa,接近大气压。根据对两种材料力学性能的分析,酚醛树脂/短切碳纤维和酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料的压缩强度和拉伸强度均可满足发动机工况要求。

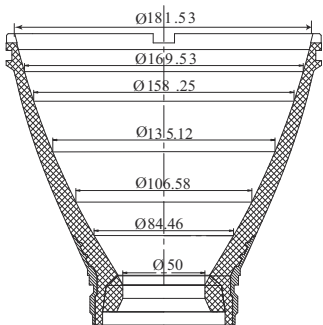


图2 扩散段内压仿真部位示意图

表2 扩散段内压及环向拉应力仿真数据

序号	扩散段内径/mm	扩散段内压/MPa	环向拉应力/MPa
1	50.00	8.526	34.51
2	84.46	2.195	6.90
3	106.58	0.570	5.33
4	135.12	0.300	4.28
5	158.25	0.195	4.14
6	169.53	0.165	4.56
7	181.53	0.135	6.11

根据仿真计算结果,在没有金属环体支撑范围内,发动机工作时扩散段内压最大为2.195 MPa。为了进一步验证不同材料扩散段样件抗压强度是否能满足发动机使用要求,分别以不同材料体系制备扩散段样件,进行水压爆破试验,分析不同材料制备的扩散段承压能力,结果见表3。

表3 烧蚀层的扩散段材料扩散段水压爆破试验结果

项目	WS FC-101-1	WS FC-102-1	WS FC-102
爆破压强/MPa	4.1	2.0	5.3
爆破状态	局部开裂	贯穿开裂	贯穿开裂
能否满足发动机要求	满足	不满足	满足

由表3结果表明,酚醛树脂/短切碳纤维复合材料制备的扩散段爆破压强为4.1 MPa,大于发动机工作时扩散段最大内压,未产生贯穿裂纹,为局部开裂,酚醛树脂/短切碳纤维复合材料制备的扩散段水压爆破视图如图3所示。爆破压强大于发动机工作时最大内压(2.195 MPa),可以满足发动机使用要求。



图3 酚醛树脂/短切碳纤维复合材料制备的扩散段水压爆破视图

酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维制备的扩散段爆破压强为2.0 MPa,酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维制备的扩散段水压爆破视图如图4所示,爆破状态为贯穿开裂,爆破压强低于发动机工作时扩散段最大内压,无法满足发动机使用要求。



图4 酚醛树脂/短切高硅氧玻璃纤维制备的扩散段水压爆破视图

酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段爆破压强为 5.3 MPa,酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的爆破视图如图 5 所示。爆破状态为贯穿开裂,爆破压强大于发动机工作时扩散段最大内压,且大于酚醛树脂/碳纤维复合材料制备的扩散段的爆破压强,可以满足发动机使用要求。



图5 酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备扩散段水压爆破视图

综合材料的力学性能、耐烧蚀性能以及扩散段样件的承压性能,以酚醛树脂/短切碳纤维(WSC-101-1)材料和酚醛树脂/长丝高硅氧(WSC-102)材料作为烧蚀层材料制备的扩散段可满足发动机使用要求。

2.2 发动机地面静试分析

根据材料试验结论,采用酚醛树脂/短切碳纤维材料和酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备喷管扩散段进行火箭发动机地面静试,验证选材满足设计指标的情况。

发动机功能设计需满足表 4 的技术指标要求,研究中通过对扩散段样件进行高温(+50 ℃)、低温(-50 ℃)、常温(+23 ℃)3 种发射环境下的发动机地面静试,表征扩散段烧蚀层烧蚀情况及对发动机性能的影响。

酚醛树脂/短切碳纤维复合材料制备的扩散段

表 4 火箭发动机工作技术指标要求

参数	单位	技术要求	备注
推力总冲量 (+23 ℃)	kN·s	≥120	—
最大推力(+50 ℃)	kN	≤35	—
最小推力(-50 ℃)	kN	≥15	—
扩散段烧蚀层平均 线烧蚀量	mm	≤2.0	扩散段不允许出现过 热、烧穿现象。

样件在进行发动机点火试验后,其金属环体及喉衬完好,扩散段密封槽根部局部存在明显穿孔,扩散段尾部内表面有明显纵向凹槽,烧蚀量较大,扩散段尾部外表面有过热现象。酚醛树脂/短切碳纤维扩散段烧蚀形貌如图 6 所示。高温、常温、低温点火试验后,扩散段烧蚀现象基本一致。发动机地面静试烧蚀及推力数据列于表 5。由表 5 可见,推力总冲量、最大推力、最小推力均满足要求,但扩散段烧蚀层平均线烧蚀量特别是出口端烧蚀量大于设计指标要求。综上所述,酚醛树脂/短切碳纤维扩散段无法满足发动机使用要求。

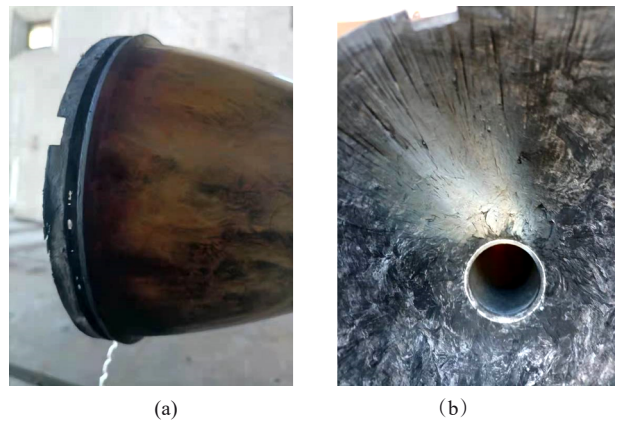


图6 酚醛树脂/短切碳纤维复合材料制备扩散段烧蚀形貌

表 5 酚醛树脂/短切碳纤维扩散段发动机试验数据

参数名称	高温试验	低温试验	常温试验
推力总冲量 (+23 ℃)/(kN·s)	—	—	118.6
最大推力(+50 ℃)/ kN	32.6	—	—
最小推力(-50 ℃)/ kN	—	15.8	—
扩散段烧蚀层平均 线烧蚀量/mm	2.51	2.38	2.46
扩散段烧蚀状态	表面过热,密 封槽烧穿	表面过热,密 封槽烧穿	表面过热,密 封槽烧穿

酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段样件在进行发动机点火试验后,其金属环体及喉衬完好,未发现烧蚀异常及局部烧蚀量过大

等现象,酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段烧蚀形貌如图7所示。发动机工作正

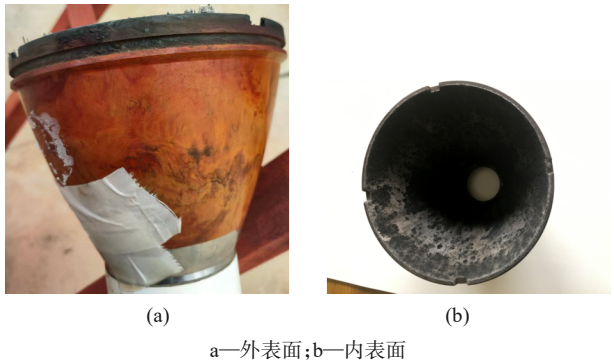


图7 酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段烧蚀形貌

常,高温、常温、低温点火试验后,不同温度发动机试验现象基本一致。发动机试验结果见表6。由表

表6 酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料扩散段发动机试验

参数名称	单位	技术要求	试验		
			高温	低温	常温
推力总冲量 (+23℃)	kN·s	≥120	—	—	129.6
最大推力 (+50℃)	kN	≤35	33.6	—	—
最小推力 (-50℃)	kN	≥15	—	17.8	—
扩散段烧蚀层平均 线烧蚀量	mm	≤2.0	1.85	1.76	1.81
扩散段烧蚀状态	—	—	扩散段无 过热、烧穿 现象	扩散段无 过热、烧穿 现象	扩散段无 过热、烧穿 现象

6表明,推力总冲量、最大推力、最小推力以及扩散段烧蚀层平均线烧蚀量均满足要求。综上所述,酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散

段可以满足发动机使用要求。

3 机理分析

根据对该火箭发动机工况分析结果可知,发动机工作时推力总冲量较大,燃气流通过喉衬后,温度逐渐降低,压强逐渐减小,但气流速度逐渐增大。燃气流到达扩散段尾部时气流速度达到最大值。

对火箭发动机试验后的扩散段样件进行解剖,分析扩散段不同部位的烧蚀情况见表7。结果表明,两种材料在扩散段前后部分呈现出相反的烧蚀规律。在扩散段前半部分,酚醛材料/短切碳纤维材料的烧蚀量更小;在扩散段尾部,特别是出口部分,酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料的烧蚀量更小,图8为酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段与酚醛树脂/碳纤维复合材料制备的扩散段烧蚀形貌。两种材料制备的扩散段靠近喉衬处局部存在轻微剥蚀,这是燃气流过喉衬后速度增大、温度较高造成的。

对扩散段各部位烧蚀环境进行分析如下。

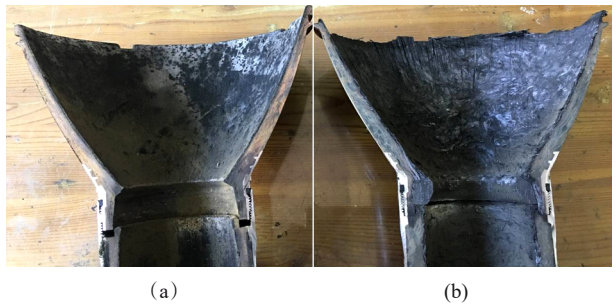


图8 酚醛树脂/长丝高硅氧玻璃纤维扩散段与酚醛树脂/碳纤维扩散段烧蚀形貌

表7 扩散段烧蚀量

位 置 ¹⁾	高温点火试验		低温点火试验		常温点火试验	
	酚醛树脂/ 短切碳纤维	酚醛树脂/长丝高硅氧 玻璃纤维	酚醛树脂/ 短切碳纤维	酚醛树脂/长丝高硅 氧玻璃纤维	酚醛树脂/ 短切碳纤维	酚醛树脂/长丝高硅 氧玻璃纤维
30 mm	1.21	1.68	1.11	1.64	1.17	1.61
60 mm	1.46	1.93	1.38	1.88	1.41	1.83
90 mm	2.05	2.23	1.96	2.08	2.04	2.03
密封槽根部	4.13 (接近烧穿)	1.72	4.06 (接近烧穿)	1.86	4.11 (接近烧穿)	1.80
尾端口	5.28 (接近碳化)	2.24	5.21 (接近碳化)	2.18	5.26 (接近碳化)	2.24
平均烧蚀量	2.83	1.96	2.74	1.93	2.80	1.90

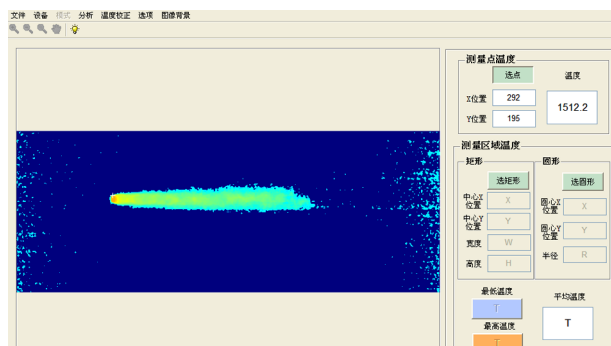
注:1)以扩散段外表面金属环体转折点为零点。

燃气流通过喉衬后,在扩散段前半部分小口部位温度约为(2 500~3 000)℃,气流速度约1~2 马赫,主要为烧蚀环境,燃气流及固体离子对扩散段冲刷

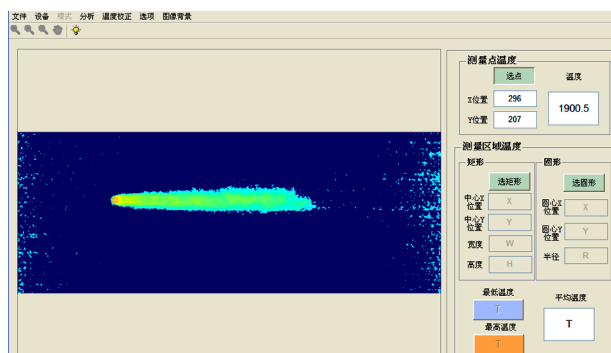
作用不明显,在该热环境下,酚醛树脂/碳纤维制备的扩散段耐烧蚀性能优于酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料,据表7数据也可看出,酚醛树脂/碳纤

维复合材料制备的扩散段前半部分的烧蚀量更小。

在扩散段尾部大口端,燃气流速度增大至3马赫,温度降至2 000℃以下,对扩散段作用主要体现为高速气流及粒子的强冲刷作用。且该发动机装药中Al粉含量较高,燃气流对扩散段的主要作用表现为 Al_2O_3 粒子侵蚀和气流剥蚀^[5-6]。同时,燃气流到达扩散段出口处时,温度相对较低,在地面静试时对扩散段出口处温度测量(见图9)温度范围为1 512~1 900℃,与高硅氧玻璃纤维熔点接近(约1 700℃)。



(a)



(b)

a—0°; b—90°

图9 扩散段出口处测温结果

图10为酚醛树脂/碳纤维和酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段的表面烧蚀形貌。酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料属于熔融-气化



(a)

(b)

a—酚醛树脂/碳纤维; b—酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维

图10 酚醛树脂/碳纤维和酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料制备的扩散段表面烧蚀照片

型烧蚀材料^[5-6],其烧蚀后形貌如图10b所示,表面附着了一层熔融后凝结而成的氧化硅保护层。分析认为,当烧蚀环境温度超过1 400℃时,材料表面的酚醛树脂基体已经分解、碳化,随着表面温度的持续升高,高硅氧玻璃纤维熔融形成高黏度的液体 SiO_2 依附在碳化层的表面而形成临时的保护层,减缓了热冲击向材料内部的烧蚀进度^[7-10]。发动机试验后,附着在扩散段烧蚀层表面的银灰色物质即为高硅氧玻璃纤维熔融冷却后形成的,此时烧蚀表面由熔融 SiO_2 薄层和突起的碳化层组成。

高硅氧玻璃纤维熔化形成的液态层具有较高的黏度,在发动机燃气流冲刷下仍可附着在扩散段烧蚀层表面,对未烧蚀的材料实施保护,并且在热环境作用下不断形成新的液态保护层,同时熔融吸热作用也起到了降温减缓烧蚀的功能。随着烧蚀进行,燃气流剪切力大于液体 SiO_2 的粘附力时,熔融后的高硅氧玻璃纤维层被燃气流吹除,其烧蚀界面逐步向材料内部退移^[11-14]。

液体 SiO_2 层吹除后,使碳化层暴露在燃气流环境中,在高速粒子和高速气流冲刷下产生烧蚀退移^[4]。当碳化层退移到和表面液态层基本重合后,碳化层逐步被熔融 SiO_2 层覆盖,从而对粒子侵蚀和气流剥蚀起到隔离减缓作用。表面液体 SiO_2 层和碳化层在燃气流作用下从表面剥离后,内部的酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维又开始重复这一过程并产生新的烧蚀界面。随着上述过程的反复进行,烧蚀界面逐步向材料的内部推进^[15-17]。

碳纤维增强酚醛树脂复合材料属于升华型烧蚀材料,碳纤维在高温下不会熔化,在高温环境下同时发生酚醛树脂分解、碳化和碳纤维的氧化、升华。利用材料直接由固态变成气态或仅经过极短暂的液态阶段的过程吸收大量热而达到防热目的。

燃气流刚通过喉衬后主要为烧蚀环境,气流剥蚀作用不明显,因为酚醛树脂/碳纤维复合材料耐烧蚀性能优于酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料,因此酚醛树脂/碳纤维复合材料制备的扩散段在此部位烧蚀量更小。在扩散段尾部,燃气流温度低于2000℃,在此温度条件下,碳纤维一直保持固体状态,在高速燃气流及高速粒子冲刷下固态纤维被切断,随碳化后树脂基体被高速燃气流成团或成片冲走。酚醛树脂/碳纤维复合材料虽然具有良好的耐烧蚀性能,但在该部位工况条件下不产生熔融吸热

及对树脂碳化层表面的保护作用,耐冲刷性能不足,表现为该部位烧蚀量较大,出现表面过热、局部烧穿现象。

4 结论

碳纤维及高硅氧玻璃纤维增强酚醛树脂基复合材料是目前固体火箭发动机喷管防烧蚀内衬最广泛使用的两类复合材料,酚醛树脂/碳纤维复合材料的力学性能及耐烧蚀性能均优于酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料,大量发动机喷管烧蚀层材料选择酚醛树脂/碳纤维复合材料。但在温度低于2 000 °C、固体粒子含量较多且燃气流速度较大的部位,酚醛树脂/高硅氧玻璃纤维复合材料表现出更为优异的耐烧蚀及抗冲刷性能。所以在选择火箭发动机喷管烧蚀层材料时,需要根据具体热环境条件进行分析选材,也可分段设计,使其综合性能达到最优。

参考文献

- [1] 张琦. 固体火箭发动机喷管扩张段补充燃烧技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
Zhang Qi. Research on supplementary combustion technology of solid rocket motor nozzle expansion section[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2018.
- [2] 严钰轩,李瑞珍,王富强. 改性碳/酚醛防隔热材料研究进展[J]. 固体火箭技术,2022,45(4):614-622.
Yan Yuxuan, Li Ruizhen, Wang Fuqiang. Research progress of modified carbon/phenolic thermal protection and insulation composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(4): 614-622.
- [3] 郭亚林,刘毅佳,李瑞珍,等. 固体发动机喷管扩张段斜向缠绕成型技术研究进展[J]. 宇航材料工艺,2014(3):12-15.
Guo Yalin, Liu Yijia, Li Ruizhen, et al. Progress of angled tape-wrapping technology for SRM nozzle exit cone[J]. Aerospace Materials & Technology,2014(3):12-15.
- [4] 李春来. 低密度纤维增强酚醛气凝胶的制备及结构性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
Li Chunlai. Preparation and structural performance research of low density fiber reinforced phenolic aerogel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2020.
- [5] 李江,郭梦飞,刘洋,等. 固体发动机绝热材料烧蚀研究进展[J]. 宇航学报,2019,40(10):1 146-1 156.
Li Jiang, Guo Mengfei, Liu Yang, et al. Review on ablation research of insulation materials for solid rocket motors[J]. Journal of Astronautics,2019,40(10):1 146-1 156.
- [6] 查柏林,黄定园,乔素磊,等. C/C复合材料烧蚀试验及烧蚀机理研究[J]. 固体火箭技术,2013,36(5):692-696.
Zha Bailin, Huang Dingyuan, Qiao Sulci, et al. Research on ablation test and ablative mechanism of carbon/carbon composite material[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2013,36(5):692-696.
- [7] 时圣波. 酚醛树脂/高硅氧复合材料的烧蚀机理及热-力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
Shi Shengbo. Ablation mechanism and thermo-mechanical behavior of silica/phenolic composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013.
- [8] 李茂源. 纤维增强酚醛防热材料改性及烧出帆理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
Li Maoyuan. Study on modification and ablation mechanism of fiber reinforced phenolic heat-proof material[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2019.
- [9] 胡励,宋佳,鲍闽,等. 一种短纤维增强烧蚀材料的体烧蚀模拟方法:CN116386745 A[P]. 2023-07-04.
Hu Li, Song Jia, Bao Min, et al. A method for simulating bulk ablation of short fiber reinforced ablative materia; CN116386745 A[P]. 2023-07-04.
- [10] John B, Mathew D, Deependran B, et al. Medium-density ablative composites: processing, characterization and thermal response under moderate atmospheric re-entry heating conditions [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46 (15): 5 017-5 028.
- [11] 王湘阳. 炭化材料烧蚀机理与热导率预测方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
Wang Xiangyang. Study on ablation mechanism and thermal conductivity inversion of charring material[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2021.
- [12] Natali M, Kenny J M, Torre L. Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review[J]. Progress in Materials Science, 2016,84:192-275.
- [13] Kumar C V, Kandasubramanian B. Advances in ablative composites of carbon based materials: A review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2019,58(51):22 663-22 701.
- [14] Uyanna O, Najafi H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects[J]. Acta Astronautica, 2020, 176:341-356.
- [15] 李磊,刘骁,周述光,等. 碳基烧蚀材料高温氧化反应机理的分子动力学研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2023,60(3): 034 003-1-034003-10.
Li Lei, Liu Xiao, Zhou Shuguang, et al. Molecular dynamics study on oxidation mechanism of carbon-based ablative materials under high temperatur[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2023, 60(3):034 003-1-034003-10.
- [16] 李伟,方国东,李玮洁,等. 碳纤维增强复合材料微观烧蚀行为数值模拟[J]. 力学学报,2019,51(3):835-844.
Li Wei, Fang Guodong, Li Weijie, et al. Numerical simulation of micro-ablation behavior for carbon fiber reinforced composites[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 53 (3):835-844.
- [17] 国义军,周述光,曾磊,等. 碳基材料氧化烧蚀的快/慢反应动力学问题[J]. 实验流体力学,2019,33(2):17-22, 101.
Guo Yijun, Zhou Shuguang, Zeng Lei, et al. Study on fast/slow reaction mechanism of carbon-based material oxidation in high speed stream of dissociated air[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2019,33(2):17-22, 101.