

纤维混织梯度织物/酚醛树脂斜叠防热材料研究

李盼盼, 刘漪涛, 秦蓉蓉, 王 猛

(北京航天新风机械设备有限责任公司, 北京 100854)

摘要: 针对超高速飞行器防热材料需求,提出了一种混织梯度织物/酚醛树脂斜叠防热材料,该防热材料是一种梯度功能材料,材料功能从外层向内层逐步由抗烧蚀向隔热过渡,从而实现防隔热一体化。抗烧蚀和隔热两个功能层之间不存在明显的界面,两个功能层采用相同的耐高温树脂基体,但是抗烧蚀层增强纤维以耐烧蚀纤维为主体,隔热层增强纤维以耐高温纤维为主体。功能层及功能梯度由抗烧蚀纤维和隔热纤维混织带实现。该防热材料采用倾斜层叠结构,铺层与飞行器航向呈一定夹角,以提高其抗冲刷性能。所得材料在高温超音速燃气流发动机上的考核结果表明,可以抵抗最高表面温度为 1750 ℃,热流密度为 2000 kW/m²,长达 40 s 的燃气流烧蚀冲刷,单位面积质量损失率小于 40 g/100 cm²,背温低于 270 ℃。

关键词: 防热材料; 酚醛树脂; 增强纤维; 混织

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0085-05

1 概 述

火箭、导弹等飞行器在工作过程中会产生高温火焰和燃烧气流,气动加热和气流剥蚀现象特别严重^[1-3]。如果没有防热措施,将导致飞行器结构强度急剧下降,很容易在大气中焚毁^[4,5]。防热设计的目的和任务就是设计出一种能经受这类气动加热环境从而使飞行器免于发生过热或烧毁的外防热材料^[6-9]。

外防热材料一般是涂层材料或复合材料类的结构防热材料,即防热复合材料。防热复合材料按基体的不同,可分为树脂基、碳基和陶瓷基等复合材料^[10]。树脂基防热复合材料具有热导率低、密度小、耐烧蚀性好、价格便宜、性能可设计性强、制备工艺简单等特性。飞行器上用的树脂基防热复合材料主要有纤维增强酚醛树脂基材料、纤维增强聚四氟乙烯材料和纤维增强有机硅树脂材料三类^[11]。随着飞行器的飞行高度及攻击范围的提高,气动热加剧,弹体热防护问题空前严重。传统的石英纤维增强酚醛树脂基、高硅氧纤维增强酚醛树脂基防热复合材料已无法满足飞行器面临的越来越严苛的使用环境要求^[12,13]。

本文提出一种可以满足当代飞行器热防护要求的混织梯度织物/酚醛树脂斜叠防热材料。该防热材料是一种梯度功能材料^[14,15],材料功能从外层向内层逐步由抗烧蚀向隔热过渡,从而实现防隔热一

体化。抗烧蚀和隔热两个功能层之间不存在明显的界面。抗烧蚀层增强纤维以耐烧蚀纤维为主体,隔热层增强纤维以耐高温纤维为主体。两个功能层采用相同的耐高温树脂基体。

功能层及功能梯度由抗烧蚀纤维-隔热纤维混织带实现,混织带的结构如图 1 所示。经纱由外向内分别为:耐烧蚀无机纤维区→过渡区→耐高温有机纤维区,纬纱为耐烧蚀无机纤维和隔热有机纤维纱间隔排布。混织带的经纱材料沿工件径向逐步变化,并由纬纱对经纱进行物理固定,从结构上保证即使在高温、高速气流的作用下,工件树脂粘接性能不失效,不会发生脱粘现象。

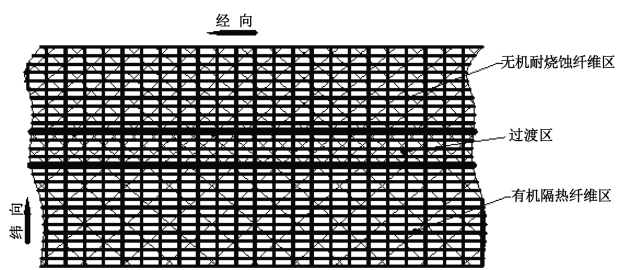


图 1 混织带的结构图

Fig. 1 Structure diagram of the mixed ribbon

防热材料采用倾斜层叠结构,具体结构如图 2 所示,铺层与飞行器航向呈一定夹角,以提高其抗冲刷性能(防止材料在气流冲刷作用下发生揭层及整体脱落现象)。

收稿日期: 2018-08-20
本文作者还有范一凡, 乔懿元。
作者简介: 李盼盼 (1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事防热涂层及防热复合材料方面的研究, 287875082@qq.com。

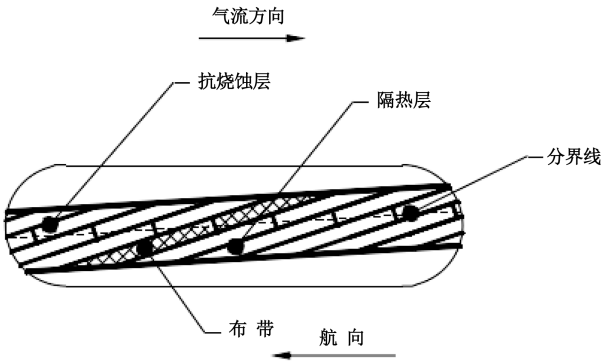


图 2 防热材料结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat-proof material structure

2 试验内容

通过对航空航天常用抗烧蚀增强材料的筛选,选定了 F-S 纤维混带作为增强材料,钡酚醛树脂作为基体树脂,按照工艺要求制备 F-S 配比梯度的斜叠材料。对其进行热导率、氧乙炔烧蚀性能测试,以此作为材料分析的依据,并通过高温超音速燃气流试验对材料进行综合性能考核。

2.1 试验材料

钡酚醛树脂:北京玻璃钢有限责任公司提供;
F-S 纤维织物带:F 为酚醛纤维,S 为石英纤维,按照两种纤维的不同比例,自主编织生产。

2.2 试体制备

(1)成型模具

模具包括压板、垫片和楔形垫板。

(2)成型设备

成型设备为平板硫化机。

(3)成型制备

将 F-S 纤维织物带浸渍钡酚醛树脂,形成预浸料;将预浸料按照一定的前进量铺贴于模具内,固化成型。成型后,通过机械加工制备成所需样品标准件。

2.3 试验测试

(1)隔热性能测试

按照 GB/T 10295—2008 测试样品的热导率。

(2)抗烧蚀性能测试

按照 GJB 323A—96 对样品的氧乙炔烧蚀性能进行测试。

(3)高温超音速燃气流试验

按照中国航天科技集团公司第一研究院第十四

研究所自主设计的测试标准,对样品的抗高温超音速燃气流性能进行测试。

3 结果与讨论

3.1 不同配比 F-S 纤维混织带对试样热导率、氧乙炔烧蚀性能的影响

由于试验材料较多,故对材料进行如下编号:F/B30 代表酚醛纤维/钡酚醛树脂,F3-S/B30 代表 75%酚醛纤维-25%石英纤维/钡酚醛树脂,F-S/B30 代表 50%酚醛纤维-50%石英纤维/钡酚醛树脂,F-S3/B30 代表 25%酚醛纤维-75%石英纤维/钡酚醛树脂,S/B30 代表石英纤维/钡酚醛树脂。

氧乙炔烧蚀试验表明增强材料中的 S 纤维含量对材料该性能的影响不大,质量烧蚀率均在 2.1 g/s ~2.3 g/s 范围内。增强材料中的 S 纤维含量对材料热导率的影响以及其具体的试验结果与变化趋势见图 3。

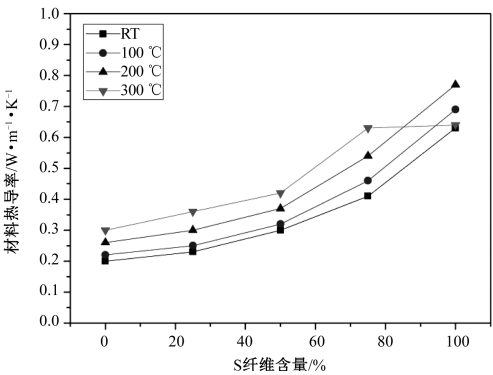


图 3 F-S 纤维混织布中的 S 纤维含量对材料热导率的影响

Fig. 3 Effect of S fiber content in F-S fiber blending fabric on thermal conductivity of materials

当 S 纤维含量较高(>50%)时,S 纤维含量对热导率影响很大(相差 0.33 W/m·K);当 S 纤维含量<30%时,热导率变化非常小(<0.252 W/m·K),如果再降低 S 纤维含量并不能有效降低热导率,还会造成材料工艺性的恶化,因此隔热层材料的 S 纤维含量应选定在 30%~40%的范围内。

3.2 增强材料中的 S 纤维含量对抗高温超音速燃气流性能的影响

不同配比 F-S 纤维混织布/酚醛树脂复合材料试样的高温超音速燃气流试验结果及其变化趋势见图 4。

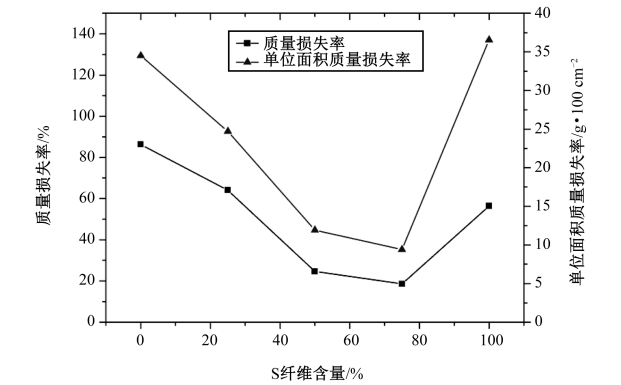


图4 F-S纤维混织布中的S纤维含量对抗高温超音速燃气流性能的影响

Fig.4 Effect of S fiber content in F-S fiber blended fabric on high temperature supersonic gas flow performance

对质量损失率数据进行分析,实验结果表明 F-S 纤维混织布中 S 纤维含量为 50%~80%时,质量损失率最低,抵抗高温超音速燃气流的性能最好。

3.3 防热材料的斜叠工艺参数的影响

3.3.1 F-S 纤维混织带参数的确定

功能层及功能梯度由 F 纤维-S 纤维混织带实现,混织带结构如图 5 所示。经纱由外向内分别为抗烧蚀区→过渡区→隔热区,纬纱为 F 纤维和 S 纤维间隔排布。混织带经纱材料的配比沿纬向逐渐递变。

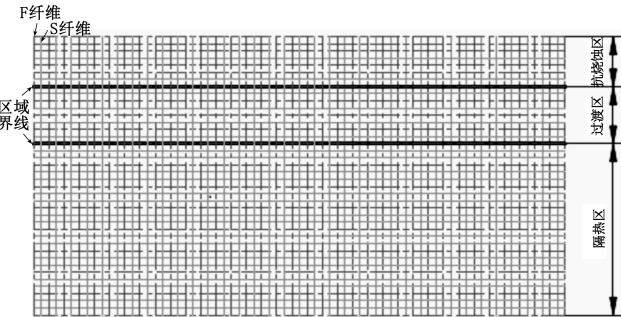


图5 F-S混织带结构示意图

Fig.5 Structure diagram of the mixed ribbon

3.3.2 材料前进量参数的确定

斜叠材料结构参数主要包括布带前进量和布带斜叠角度两个参数,具体形式如图 6 所示。这两个参数具有连带关系,如果布带厚度一定,只要规定其中一个,另一个参数也是唯一对应的。

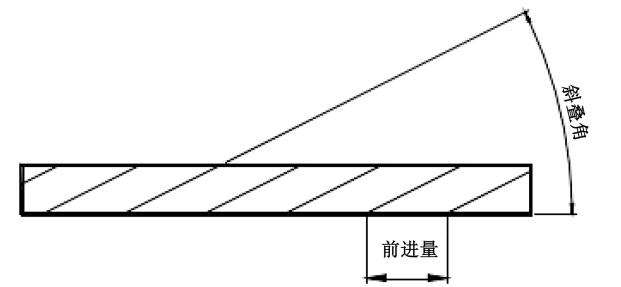


图6 斜叠材料结构参数示意图

Fig.6 Schematic diagram of structural parameters of oblique stack

由于前进量在材料制备过程中比较好控制,因此选定前进量作为控制参数。

以 F-S 纤维混织带/钕酚醛树脂(F-S/B30)预浸料作为原材料,根据工艺允许的前进量范围选定 2 mm、3 mm、4 mm 三种前进量的材料,以高温超音速燃气流试验结果作为判定依据。前进量对材料抵抗高温超音速燃气流性能的影响如图 7 所示。

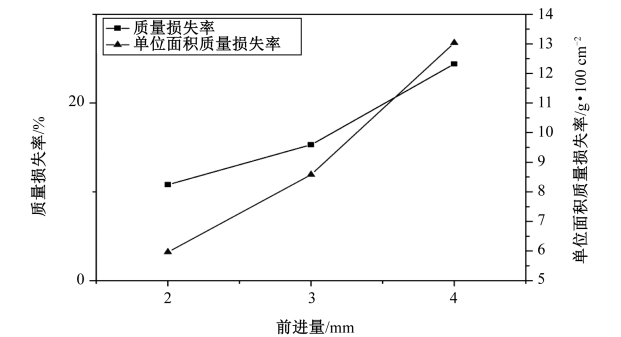


图7 前进量对材料抵抗高温超音速燃气流性能的影响

Fig.7 Effect of forward amount on the resistance of materials to high temperature supersonic gas flow

由质量损失率分析可知,材料的抗冲刷烧蚀性能随着前进量的增加而降低,当材料前进量为 2 mm 时材料的抗冲刷烧蚀性能最好,因此在工艺允许的条件下应选用较小的前进量。由于试片制备工艺的限制,前进量最小只能达到 2 mm。

3.4 防热材料性能验证考核

根据上述试验结果,最终确定防热层总厚度为 5 mm,抗烧蚀层厚度为 0.8 mm,隔热层厚度为 4.2 mm,如图 8 所示。采取斜铺结构,斜铺角为 7°,前进量为 2 mm。

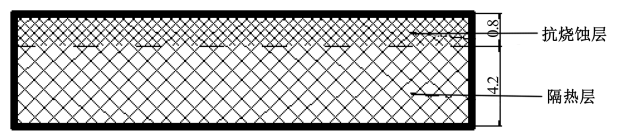


图 8 隔热层试样结构示意图

Fig. 8 Heat treatment layer sample structure diagram

对上述试片进行高温超音速燃气流发动机冲刷考核,根据某飞行器产品的设计输入设定了加严考核的冲刷流场,并对高温超音速燃气流发动机的工作参数进行校核,获得的参数组合如表 1 所示。

表 1 高温超音速燃气流发动机综合考核试验参数明细表

Table 1 High-temperature supersonic gas flow engine comprehensive assessment test parameter list				
试验时间	火焰距离	火焰夹角	表面最高温度	冷壁热流密度
/s	/mm	/°	/℃	/kW·m ⁻²
40	1000	15°	1750	2000

试验结果如表 2 与表 3 所示,该隔热材料试样在最高表面温度为 1750 ℃,热流密度为 2000 kW/m²,长达 40 s 的燃气流冲刷下,材料表层只是出现部分剥蚀,并无开裂和大面积脱落现象,单位面积质量损失率为 37 g/100 cm²,最高背温为 262.7 ℃。

表 2 试样烧蚀试验结果明细表 1

Table 2 Sample ablation test results list 1

质量损失量	单位面积质量损失率	厚度损失量	线烧蚀率
/g	/g·100 cm ⁻²	/mm	/mm·s ⁻¹
67.2	37	0.48	0.012

表 3 试样烧蚀试验结果明细表 2

Table 3 Sample ablation test results list 2

加热过程	加热过程	加热过程	加热过程	加热结束	加热结束	加热时间 /s
中表温最	中表温最	中背温最	中背温最	后背温最	后背温最	
高值	高值出现	高值	高值出现	高值	高值出现	
/℃	时间/s	/℃	时间/s	/℃	时间/s	
1711.00	40	75.54	40	262.70	133	40

4 结 论

以纬纱为 F 纤维和 S 纤维间隔排布,经纱的材料配比沿纬向逐渐递变的混织带作增强织物,以钼

酚醛树脂为基体,以 2 mm 为布带前进量斜叠制成总厚度为 5 mm 的隔热材料(抗烧蚀层厚度为 0.8 mm,隔热层厚度为 4.2 mm),在高温超音速燃气流发动机上进行考核,可以抵抗住最高表面温度为 1750 ℃,热流密度为 2000 kW/m²,长达 40 s 的燃气流冲刷,单位面积质量损失率为 37 g/100 cm²,背温低于 262.7 ℃。

该隔热材料通过纤维混编、布带梯度、斜叠成型等,最大限度地实现了复合材料的性能优化,是一种抗燃气流冲刷、烧蚀隔热性能优异的隔热材料,在各类飞行器中具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 唐磊,王夕聚,等. 耐高温隔热材料技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[2] 郭正. 宇航复合材料[M]. 第一版. 北京:宇航出版社,1999: 144-145.

[3] 邓火英,谭延,谭朝元,等. 适用于长时间烧蚀防热的蜂窝增强低密度材料[J]. 宇航材料工艺,2014(1): 89-91.

[4] 马天信,李晓奋,周一博. HG 系列隔热隔热涂层的研究及其性能试验[J]. 航天制造技术,2015(4): 1-4, 9.

[5] 王安龄,後业伟,贺立新,等. 采用非均匀隔热材料进行高速飞行器隔热设计的隔热效果研究[J]. 工程热物理学报,2007, 28(7): 655-657.

[6] Ding R G, Ojo O A, Chaturvedi M C. Laser beam weld-metal micro-structure in a yttrium modified directionally solidified Ni₃Al-base alloy[J]. Intermetallics, 2007, 15(12): 1504-1510.

[7] 郭玉明. 航天功能复合材料应用与发展趋势[C]//南京:2005 年南京复合材料技术发展研讨会. 2005.

[8] 姜贵庆. 返回式卫星烧蚀、热防护机理与数值模拟[J]. 中国空间科学年报,1990(6): 34-42.

[9] 张宗强,匡松连,李翔,等. 一种高孔隙轻质隔热材料炭化微观分析[J]. 宇航材料工艺,2014(1): 117-121.

[10] 蒋凌澜,陈阳. 树脂基复合材料在航天飞行器气动热防护上的应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(7): 78-84.

[11] 沈军,谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用[J]. 材料科学与工艺,2018, 16(5): 737-740.

[12] 赵梦熊. 载人飞船返回舱的烧蚀热防护[J]. 气动与测量控制, 1996, 10(3): 1.

[13] 王鸿奎,杨汝平. 航天飞机贮箱热防护系统[J]. 导弹与航天运载技术,2004(4): 26.

[14] 魏化震,王成国,王海庆. 新型抗烧蚀酚醛树脂的研究[J]. 材料工程,2003(3): 31.

[15] 闫联生,姚冬梅,杨学军. 碳/酚醛结构材料的研究[J]. 宇航材料工艺,2000, 30(6): 35.

RESEARCH OF THE MIXED-WEAVING GRADIENT FABRIC REINFORCED PHENOLIC
RESIN OBLIQUE MATERIALS FOR HEAT-RESISTANCE

LI Pan-pan, LIU Yi-tao, QIN Rong-rong, WANG Meng

(Beijing Aerospace Fresh Air Machinery Equipment Co., Ltd., Beijing 100854, China)

Abstract; This article addresses the demand for the heat-resistant materials of aircraft, the structural of mixed-weaving gradient fabric reinforced phenolic resin oblique materials were introduced. The heat-resistant material is a gradient functional material, and the function of the material gradually transform from the outer layer to the inner layer from ablation to heat insulation, achieving integration of heat insulation. The two functional layers use the same high temperature resin matrix with thereby no obvious interface. The anti-ablative layer reinforcing fiber is mainly composed of ablation resistant fiber, and the heat insulating layer reinforcing fiber is mainly composed of high temperature resistant fiber. The functional layer and gradient effects are achieved by ablative fiber-heat insulation fiber of woven fabric, shaping by oblique winding. To improve the materials anti-scour performance, the ply direction of woven fabric presents a certain angle with the aircraft's heading. The obtained materials (mounted on the tooling bottom plate) is evaluated on a high-temperature supersonic gas flow engine, which can withstand the heat flow density of 1750 ℃, 2000 kW/m², scouring up to 40 s. The result shows that the rate is less than 40 g/100 cm² and the back temperature is below 270 ℃.

Key words; heat-resistant materials; phenolic resin; reinforcing fiber; mixed-weaving

(上接第 52 页)

STUDY AND DESIGN OF AUTOMATIC PAVING SYSTEM OF GLASS FIBER
CLOTH FOR M-W CLASS WIND TURBINE BLADE

CHEN Chuan-xun¹, ZHANG Hua-qiang^{1*}, LIU Wei-sheng², YANG Xian-hai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shangdong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Group Company Limited, Lianyungang 222000, China)

Abstract; In order to resolve the problems as high labor intensity, low efficiency and being harmful to health of artificial laying of glass fiber cloth on wind turbine blades, this paper designed a set of automatic laying system of glass fiber cloth on wind turbine blades, based on principle and working procedure of artificial laying of glass fiber cloth on wind turbine blades. Adopting the advanced sensing information acquisition technology, the control principle and technology and the information fusion technology, this system can optimize the path planning and adjust the roll posture and placement speed, according to the profile of the blade. The motion trajectory of the system is precisely controllable, and the cloth roller posture and rotation speed are adjusted adaptive. The results show that the designed paving system has better stability, high paving efficiency, and a strong engineering application value, and it can also greatly reduced labor intensity.

Key words; wind turbine blades; automatic laying; path planning; adaptive