

2.5D 衍生结构 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的经向力学性能

张 剑 吕 毅 赵英民

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

文 摘 以几种不同的 2.5D 衍生结构织物为增强体,制备了法向增强、经向增强及经法向增强 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料,比较了上述材料与现有 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的经向力学性能,并研究了经法向增强 2.5D 结构复合材料中增强纱比例、纤维体积分数与材料性能之间的关系,对织物结构进行了优化。结果表明,经法向增强 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的经向力学性能较现有 2.5D 复合材料有显著提高,该材料在较低密度下(1.6 g/cm^3),经向拉伸强度与现有材料(1.65 g/cm^3)持平,且经向压缩强度接近现有材料的 4.3 倍。

关键词 2.5D 衍生结构, $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$, 复合材料, 力学性能

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.020

Mechanical Properties in Warp Direction of 2.5D Derived Structures $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ Composites

ZHANG Jian LV Yi ZHAO Yingmin

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

Abstract Several 2.5D derived structures $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ composites were fabricated by sol-gel using warp-laid-in 2.5D woven structure, z-laid-in 2.5D woven structure and warp & z-laid-in 2.5D woven structure. The mechanical properties in the warp direction between these composites and prior 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ composite were compared in this paper, and so the effects of the straight warp yarn proportion and fiber volume fraction on the mechanical properties. The fiber reinforcement architecture of warp & Z-laid-in 2.5D fabric was optimized on this basis. The results show that the mechanical properties of composites in the warp direction have been improved obviously by using warp & Z-laid-in 2.5D fabric as the reinforcement. While the longitudinal tensile strength remained basically unchanged, the longitudinal compressive strength of the low density composites (1.6 g/cm^3) increased by 4.3 times compared with prior high density 2.5D composite (1.65 g/cm^3).

Key words 2.5D derived structures, $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$, Composites, Mechanical properties

0 引言

天线罩既是飞行器结构的重要组成部分,又是保护天线系统不受高速飞行造成的恶劣气动环境影响、正常进行信号传输工作的屏障,是一种集透波、防热、承载和抗蚀等多功能于一体的部件^[1-4]。对于马赫数大于 4 的高速飞行器,气动环境严酷,将导致天线罩的使用温度达到 600°C 以上,继而对透波材料的力、热、电性能提出了严格的要求^[5-6]。

目前,耐温大于 600°C 且成熟度较高的透波材料体系只有融石英陶瓷和石英纤维增强二氧化硅($\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$)复合材料。融石英陶瓷脆性高,使用可

靠性低,无法满足高马赫数大载荷飞行器天线罩的使用要求,而由于连续纤维的增强、增韧作用, $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的力学性能较融石英陶瓷有显著提高,使用可靠性大幅提升,其中 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料已在国内外多个型号天线罩上获得成功应用,逐渐成为了耐高温陶瓷天线罩的首选材料^[7-9]。

由于新型飞行器飞行速度更快、飞行时间更长,与之配套的大尺寸非回旋体天线罩及大跨度曲面板天线窗对耐高温透波材料提出了更高的承载、透波要求。现有 2.5D $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的力学性能仍有待进一步提高,特别是经向力学性能的不足严重地限

收稿日期:2015-04-15

作者简介:张剑,1982 年出生,博士,主要从事透波复合材料的研究。E-mail:firebatgo@163.com

制了其在高马赫数大载荷透波构件上的应用。通过提高增强织物的纤维体积分数或 SiO₂ 基体的致密化程度可以在一定程度上实现材料强度的提高,但纤维体积分数及致密化程度的提高,必然导致材料密度和介电常数的增大,影响材料的电性能^[10-12]。因此,亟需一种在不影响材料介电性能的前提下,提高 2.5D SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料经向力学性能的方法,制备出更高强度的 SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料,满足新型飞行器对透波材料的需求。

纤维增强复合材料的力学性能与增强织物的编织结构密切相关,增强织物中纱线的分布决定了复合材料的各向异性^[13-14]。在 2.5D 织物结构基础上,沿经向和法向引入或同时引入纱线,可以形成多种变化的 2.5D 衍生结构织物,采用 2.5D 衍生结构织物制备 SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料有望成为改善 2.5D SiO_{2r}/

SiO₂ 复合材料经向力学性能的有效手段^[15]。本以不同的 2.5D 衍生结构织物为增强体,分别制备了法向增强、经向增强及经法向增强 2.5D SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料,比较了该材料与现有 2.5D SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料的经向力学性能,并通过研究增强纱比例、纤维体积分数与材料性能之间的关系,对织物结构进行了优化。

1 试验

1.1 原材料

SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料的制备以酸性硅溶胶和石英织物预制体为原材料。酸性硅溶胶密度为 1.12 ~ 1.16 g/cm³,pH 值为 2 ~ 4。石英纤维由湖北荆州菲利华石英玻璃有限公司生产,采用 2.5D 机织技术将其加工成 2.5D 及其衍生结构石英织物预制体。具体参数见表 1。

表 1 2.5D 及其衍生结构石英织物预制体结构参数表

Tab.1 Structural parameters of 2.5D and 2.5D derived structures silica fiber fabrics

织物	缝经纱 细度	衬经纱 细度	纬纱 细度	法向纱 细度	缝经纱密度 /根·(cm·层) ⁻¹	衬经纱密度 /根·(cm·层) ⁻¹	纬纱密度 /根·(cm·层) ⁻¹	法向纱密度 /根·(cm·层) ⁻¹	纤维体积分数 /%
F ₀	190tex * 4	-	190tex * 8	-	8.6	-	2.2	-	45.2
F ₁	190tex * 4	190tex * 4	190tex * 8	-	3	6	2.1	-	39.1
F ₂	190tex * 4	-	190tex * 8	190tex * 1	8.5	-	2.1	8.5 * 2.0	44.9
F ₃	190tex * 4	190tex * 4	190tex * 8	190tex * 1	3	6	2.1	3.0 * 2.1	39.5
F ₄	190tex * 4	190tex * 4	190tex * 8	190tex * 1	4.4	4.4	2.1	4.4 * 2.1	45.1
F ₅	190tex * 3	190tex * 3	190tex * 6	190tex * 1	3.1	6.2	2.2	3.1 * 2.1	43.2

1.2 复合材料平板的制备

采用溶胶-凝胶法制备 2.5D SiO_{2r}/SiO₂ 复合材料平板。具体的工艺流程如图 1 所示。

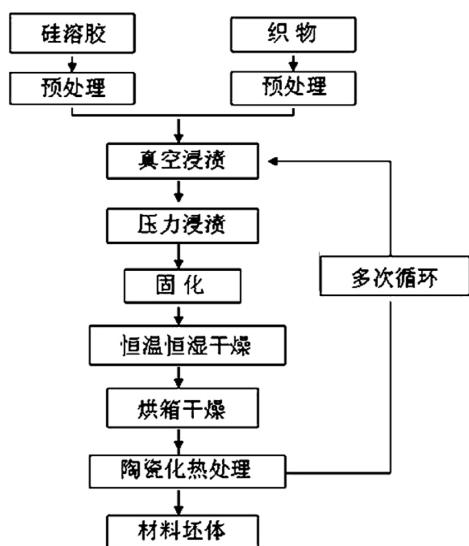


图 1 2.5DSiO_{2r}/SiO₂ 复合材料溶胶-凝胶成型工艺流程图

Fig.1 Flow chart for the preparation of 2.5D SiO_{2r}/SiO₂ composite via sol-gel route

为了使复合材料达到预期的致密度,此工艺需循

环数次,由石英织物预制体 F₀ ~ F₅ 制备的复合材料,分别记作 C₀ ~ C₅。

1.3 表征

按照 GB/T 1463—2005 进行材料的密度测量。按照航天特种材料及工艺技术研究所标准 Q/HP 48—2013 进行材料的室温经向拉伸性能及压缩性能测试。按照 GB/T 5597—1999 进行材料的介电常数和损耗角正切值测试。按照 GJB 330A—2000 进行材料的比热容测试。按照 GB/T 10295—2008 进行材料的热导率测试。按照 GJB 332A—2004 进行材料的热膨胀系数测试。

2 结果与讨论

2.1 2.5D 衍生结构的经向力学性能比较

纤维增强复合材料的力学性能与增强织物的结构密切相关,近年来,复合材料在航空、航天等行业中的应用逐渐从次承力功能件发展到主承力功能结构件,因而人们对立体织物复合材料的研究兴趣越来越大。2.5D 结构复合材料是立体织物复合材料的一个重要分支,由一系列伸直的纬纱和弯曲的经纱构成。该结构的最大特点是结构中经纱沿着与织物的厚度

方向呈一定角度的方向配置,从而将多层纬纱连成一个稳定的不分层的整体结构,增强了织物的层间连接强度。^[13]在 2.5D 织物结构基础上,沿着经向、法向或同时引入纱线,可以形成经向增强 2.5D、法向增强

2.5D 及经法向增强 2.5D 结构等多种变化的衍生结构,为复合材料强度设计提供更多的可选择空间^[14]。图 2 为 2.5D 及上述几种其衍生结构织物预制体的结构示意图。

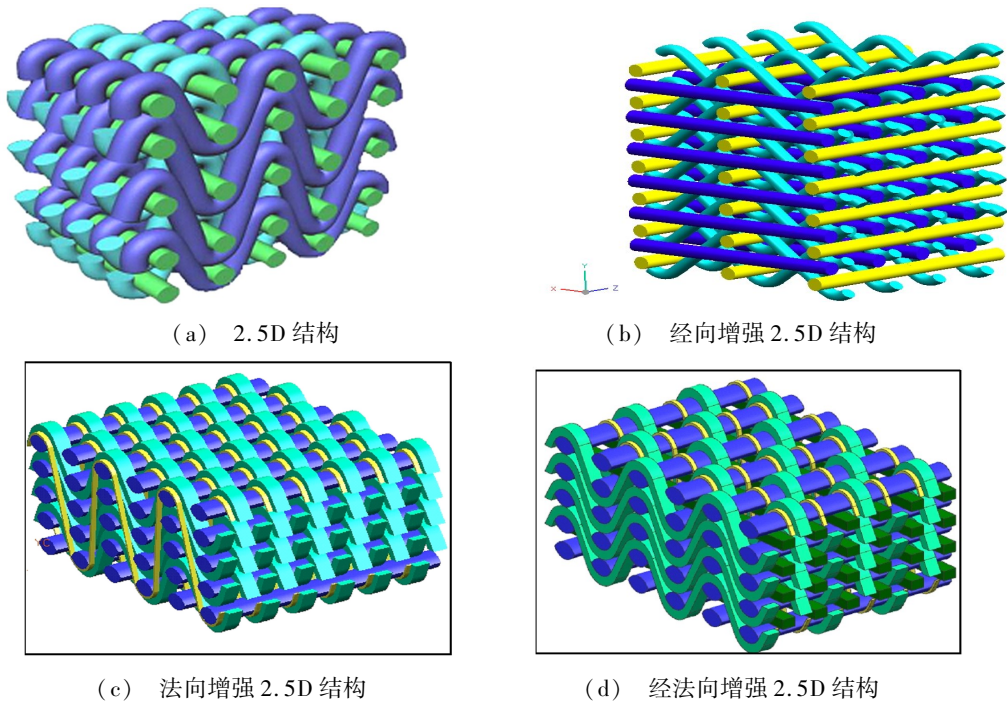


图 2 2.5D 及其衍生结构织物预制体的结构示意图

Fig. 2 Schematic representation of 2.5D and 2.5D derived structures fabrics

表 2 列出了编织参数相近的 2.5D 及其衍生结构 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料在室温条件下的力学性能数据。可以看出,与 2.5D 结构复合材料相比,经向增强 2.5D 结构复合材料的经向拉伸强度和压缩强度

都有明显提高,但纬向压缩降低较为明显。而法向增强 2.5D 结构复合材料的经向压缩强度有明显提高,但经向拉伸强度有所下降。

表 2 2.5D 及其衍生结构 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of 2.5D and 2.5D derived structures $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ composites

复合材料	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	纤维体积分数/%	经向拉伸强度/MPa	纬向拉伸强度/MPa	经向压缩强度/MPa	纬向压缩强度/MPa
C_0	1.65	45.2	66	29	24	107
C_1	1.57	39.1	78	25	61	66
C_2	1.64	44.9	55	28	53	97
C_3	1.55	39.5	54	23	99	73

2.5D 结构织物中经纱呈弯曲状态,纬纱是直的。由于在承力方向上,直纱的效果要好过弯纱,因此,经向增强 2.5D 结构复合材料中大量伸直的衬经纱可以在经纬纱比例不变的前提下给复合材料提供更多的经向拉伸和压缩强度。但是由于大量直经纱的加入,经纱对纬纱的束缚作用减小,影响了材料的纬向

宇航材料工艺 压缩,试验结果也证实了这一点。法向增强 2.5D 结构复合材料中没有伸直的衬经纱,是依靠法向纱的加入改善材料经向力学性能,参见图 3。一方面,法向纱与经纱的界面摩擦可以给弯曲经纱在法向方向提供一定的束缚,避免弯曲经纱在受压时沿法向“鼓肚”,从而提高复合材料的经向

压缩强度;另一方面,法向纱在经纬纱交叉点的加入,进一步又挤压了经纱,增加了它的弯曲程度,从而降低了复合材料的经向拉伸强度。此外,从试验结果可知,法向纱的添加对纬向压缩的影响并不大。

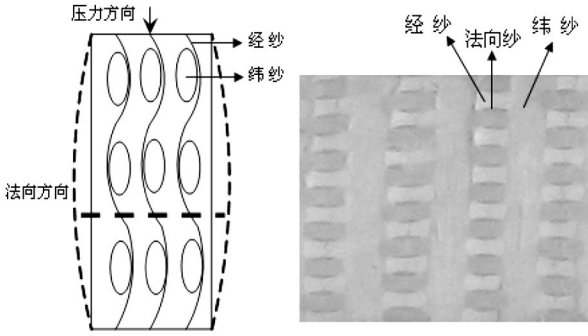


图3 法向纱对复合材料力学强度影响的示意图

Fig. 3 Schematic representation for the effects of the z direction fiber on the mechanical properties of composites

结合上述分析,首先,衬经纱的加入可以有效地提高材料的经向拉伸和压缩性能,但影响了材料的纬向压缩性能;其次,法向纱的加入可以有效地提高材

料的经向压缩性能,但影响了材料的经向拉伸性能。因此,如果同时引入上述两种纱线,将有可能在不影响材料纬向压缩的情况下,提高材料的经向拉伸性能和压缩性能。 C_3 为经法向增强 2.5D 复合材料,对比 C_3 与 C_1 、 C_2 的力学性能数据,可以发现该结构经法向增强 2.5D 复合材料的经向压缩性能确是三种 2.5D 衍生结构复合材料中最高的,其综合力学性能有所改善,基本与预测相符,但并不理想,织物结构有待进一步优化。

2.2 经法向增强 2.5D 结构参数优化

经法向增强 2.5D 结构复合材料的优化方向是提高织物的纤维体积分数,全面提高材料的内面力学性能。调整织物结构中弯曲的缝经纱与非弯曲的衬经纱之间的比例或改变纱线的合股数都是提高织物纤维体积分数的有效手段,为此采用相同的复合工艺制备了复合材料 C_4 与 C_5 。表 3 中列出了几种不同的经法向增强 2.5D 结构复合材料的室温力学性能数据,结合表 1 中的织物结构参数,可以对经法向增强 2.5D 结构参数与复合材料力学性能的关系进行初步的分析。

表 3 经法向增强 2.5D 结构 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of warp & Z-laid-in 2.5D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composites

复合材料	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	纤维体积 分数/%	经向拉伸 强度/MPa	纬向拉伸 强度/MPa	经向压缩 强度/MPa	纬向压缩 强度/MPa	弯曲强度 /MPa
C_0	1.65	45.2	66	29	24	107	78
C_3	1.55	39.5	54	23	99	73	54
C_4	1.6	45.1	64	25	88	80	63
C_5	1.58	43.2	65	28	105	83	67

首先,从纤维体积分数以及密度上看, C_4 均高于 C_3 ,这是由于 C_4 中,衬经纱占经纱总含量的 1/2,而 C_3 中衬经纱占经纱总含量的 2/3。衬经纱含量提高会导致织物单元中孔隙率的提高,从而降低了织物的体积分数。但从力学性能数据上看,尽管 C_4 的拉伸、弯曲性能均高于 C_3 ,但其压缩性能不及 C_3 ,这与通常 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料密度越高,纤维体积分数越高,力学性能越好的规律不相符,说明纤维编织结构参数的调整在其中发挥了作用。 C_3 中伸直的衬经纱含量的提高,使得材料的压缩性能得到了明显的改善,若能在保持衬经纱比例的前提下提高 C_3 的纤维含量和密度,其综合性能将优于 C_4 板。

纤维体积分数更高的 C_5 是通过改变 C_3 中的经、

纬纱合股数及面密度制备的。纱线合股数的降低及面密度的提高将有利于提高织物的纤维体积分数。从表中可以看出,尽管 C_5 的纤维体积分数及密度均略低于 C_4 ,但其拉伸、压缩、弯曲性能均明显优于 C_4 与 C_3 。在这三种经法向增强 2.5D 结构 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料中, C_5 板块的参数最优。

作为耐高温透波复合材料,除了力学性能还要考虑到材料的电性能与热物理性能,表 4 给出了优化后的经法向增强 2.5D 结构复合材料 C_5 与 2.5D 结构复合材料 C_0 的电性能及热物理性能数据。从表 4 可以看出,具有更低的密度的 C_5 与现有材料 C_0 相比具有更好的介电性能和基本相当的热物理性能,是一种理想的高强度耐高温透波复合材料。

表4 2.5D 结构 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的电性能及热物理性能Tab. 4 Dielectric and thermophysical properties of 2.5D SiO_{2f}/SiO₂ composites

复合材料	密度 /g·cm ⁻³	介电常数	损耗角正切 /10 ⁻³	线胀系数(RT-500℃) /10 ⁻⁶ K ⁻¹	热导率(RT-300℃) /W·(m·K) ⁻¹	比热容(RT-500℃) /kJ·(kg·K) ⁻¹
C ₀	1.65	3.1	7.6	0.55	0.69	1.05
C ₅	1.58	3.02	6.3	0.31	0.66	1.08

3 结论

以几种不同的 2.5D 衍生结构织物为增强体,制备了法向增强、经向增强及经法向增强 2.5D SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料,比较了该材料与现有 2.5D SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的经向力学性能,给出了织物结构影响材料经向力学性能的可能机理,设计出经法向增强 2.5D 结构并研究了该结构复合材料中增强纱比例、纤维体积分数与材料性能之间的关系,对织物结构进行了进一步优化。

(1) 经过优化,经法向增强 2.5D SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的经向力学性能较现有 2.5D 复合材料有着显著的提高,是一种电性能优异的低密度高强度 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料。

(2) 该材料在较低密度下(1.6 g/cm³),经向拉伸强度、纬向拉伸强度与现有材料(1.65 g/cm³)基本持平,纬向压缩强度和弯曲强度略有下降,而经向压缩强度大幅提高,接近现有材料的 4.3 倍。

(3) 采用 2.5D 衍生结构织物制备复合材料是改善 2.5D 复合材料力学性能的有效手段,对进一步扩大 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的应用范围及研制特定方向力学性能要求较高的大载荷透波构件具有很大的现实意义。

参考文献

[1] 黎义,张大海,陈英,等. 航天透波多功能材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000,30(5):1-5

[2] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京:宇航出版社,1991

[3] 韩桂芳,陈照峰,张立同,等. 高温透波材料研究进展

[J]. 航空材料学报,2003,23(1):57-62

[4] 袁海根,周玉玺. 透波复合材料研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料,2006,4(5):30-36

[5] 李斌,张长瑞,曹峰,等. 高超音速导弹天线罩设计与制备中的关键问题分析[J]. 科技导报,2006,24(8):28-31

[6] 姜勇刚,张长瑞,曹峰,等. 高超音速导弹天线罩透波材料研究进展[J]. 硅酸盐通报,2007,26(3):500-505

[7] 张大海,李仲平,范锦鹏. 热透波材料技术研究进展[J]. 中国材料进展,2012,31(8):1-6

[8] 于佩志,张涛,王晓薇. 2.5D 石英纤维织物增强二氧化硅基复合材料弯曲性能测试研究[J]. 宇航材料工艺,2004,34(5):58-61

[9] 贺光军,李鹏举. 复合石英陶瓷材料制造工艺研究[J]. 空间电子技术,2006(增刊):186-192

[10] 李仲平. 热透波机理与热透波材料[M]. 北京:中国宇航出版社,2013

[11] 李端,张长瑞,李斌,等. SiO_{2f}/SiO₂-BN 复合材料的制备及其性能[J]. 复合材料学报,2011,28(3):63-68

[12] 韩爽,蒋凯辉,唐军务,等. 2.5DSiO_{2f}/SiO₂ 复合材料制备工艺及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(增刊2):458-461

[13] 曹海建,钱坤,盛东晓. 2.5D 机织复合材料结构与力学性能关系的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2009(3):13-15

[14] 李献鑫,孙颖,陈利,等. 立体织物在二氧化硅基复合材料方面的应用前景[J]. 纺织学报,2013,34(1):143-150

[15] 朱永新,崔海涛,温卫东. 2.5 维机织复合材料经向拉伸弹性模量预测与试验验证[J]. 复合材料学报,2013,30(3):198-204

(编辑 任涛)