

# 天线罩针刺织物根部结构设计及材料性能研究

吴 焘, 苑贺楠, 李 阳, 秦高磊, 杨 静, 郑 晨, 杨小波

(航天特种材料及工艺技术研究所, 北京, 100074)

**摘要** 针对耐高温天线罩对根部强度及根部材料与金属连接件热膨胀系数匹配性的特殊要求, 设计了多种针刺结构石英纤维天线罩织物, 并在罩体根部引入氧化铝纤维, 系统研究了罩体根部材料的性能情况。结果表明适当降低网毡含量可以提升材料的拉伸性能, 但材料的层间剪切强度会有所下降, 压缩强度在网毡含量较低的情况下也有所降低。通过在根部引入氧化铝纤维, 罩体根部的热膨胀系数有明显提升, 但材料的高温拉伸强度随氧化铝纤维含量的增加呈先下降后上升的趋势。文中对相关工艺及材料性能研究为耐高温天线罩的设计提供了参考。

**关键词** 针刺织物结构设计; 天线罩; 氧化铝纤维; 热膨胀

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.003

**中图分类号** TB332 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0017-05

## A Design of Root Structure with Needle Punching Fabric for Radome and Study of Properties of Composite Material

WU Tao, YUAN Henan, LI Yang, QIN Gaolei, YANG Jing, ZHENG Chen, YANG Xiaobo  
(Aerospace Institute of Advanced Materials and Processing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract** In view of a high temperature resistant radome setting special demands on root strength and matching of coefficient of thermal expansion between root material and metal connector, several kinds of quartz fiber fabric with needled structures for radome are designed, alumina fibers are introduced into the root of the needle punching fabric, and the properties of the composite materials at the root of the radome are studied systematically. The results show that the proper reduction of the content of felt in needle punching fabric can improve the tensile strength in the composite material but the inter-laminar shear strength and compressive strength of the composite can also be partly reduced. Although the coefficient of thermal expansion of the composite material at the root of radome can be improved by introducing the alumina fiber into the root of radome obviously, the tensile strength of the composite material at high temperature show a kind of U-shaped trend with the increasing content of alumina fibers, i. e. descending in advance and climbing behind. The research of the relevant technology provides a reference for the design of high temperature resistant radome.

**Key words** design of needle punching fabric; radome; alumina fibers; thermal expansion

**收稿日期:** 2023-05-24

**作者简介:** 吴 焘(1986—), 男, 江西永新人, 高级工程师, 研究方向为透波复合材料等。E-mail: 156160351@qq.com

**引用格式:** 吴焘, 苑贺楠, 李阳, 等. 天线罩针刺织物根部结构设计及材料性能研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 17-21. WU Tao, YUAN Henan, LI Yang, et al. A Design of Root Structure with Needle Punching Fabric for Radome and Study of Properties of Composite Material[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 17-21.

随着飞行器飞行速度朝高马赫数发展,雷达天线罩面临愈发严酷的气动热环境。高马赫数条件下,天线罩罩体大面积温度在  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,传统的树脂基天线罩无法满足高温使用要求,陶瓷基透波材料成为制备耐高温天线罩的最佳选择。在已有的陶瓷基透波材料中,石英纤维增强二氧化硅复合材料由于其良好的高温力学强度、优异的高温介电性能及抗热振性能,成为国内应用最广泛的高温透波材料<sup>[1-8]</sup>。石英纤维增强二氧化硅复合材料在非烧蚀条件下可在室温至  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下较长时间使用,在烧蚀条件下,可耐受  $1\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的短时高温。

石英纤维增强二氧化硅复合材料通常采用石英纤维预制体多次浸渍二氧化硅溶胶制备而成,早期石英纤维增强二氧化硅复合材料天线罩的预制体多采用 2.5D 结构,织物的制作周期及成本较高。为了降低产品的研制成本,织物厂家近年来开始采用针刺工艺制备天线罩预制体织物<sup>[9]</sup>。针刺结构石英纤维预制体以石英纤维网毡、石英纤维布层为重复单元,采用针刺工艺进行接力针刺成型,生产过程中刺针将平面层中的短纤维引入并迁移至法向,使石英纤维网毡和石英纤维织物产生连接,逐层叠加形成三维结构<sup>[10-15]</sup>。针刺预制体具有整体性好、不易分层、孔隙分布均匀等优异性能,石英纤维针刺预制体内部结构与针刺工艺参数的多样性,使预制体具有极佳的可设计性。

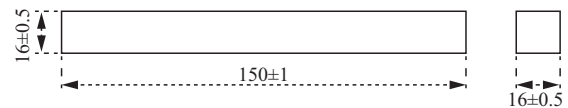
受限于较低的纤维体积含量,石英纤维针刺结构预制体应用于天线罩产品时,需重点关注罩体根部连接区附近的织物结构设计。天线罩根部承受的力载荷相对于前端更大,而且天线罩根部通常通过金属连接件与其他舱段连接,金属材料的热膨胀系数高于罩体材料,存在高温下与罩体材料存在热膨胀系数不匹配的问题,会带来较大的热应力,需通过合理的织物结构设计保证罩体的根部强度。目前对石英纤维针刺结构预制体的织物性能已有研究<sup>[16-18]</sup>,但实际复合材料产品的材料性能研究较为缺乏<sup>[19]</sup>,为天线罩织物结构设计带来难题,因此本文设计了多种针刺结构石英纤维天线罩织物并复合成型,并研究了罩体根部材料的性能情况,为天线罩石英纤维针刺织物的设计与优化提供参考和依据。

## 1 研究方法

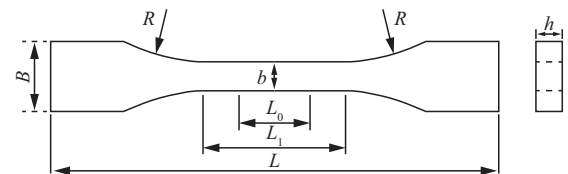
针对天线罩根部性能需求,本文设计了不同网毡含量的针刺织物,通过采用二氧化硅溶胶多次复合浸渍,制备了致密度较高的天线罩坯体,从坯体根部取样,测试罩体根部材料的压缩性能、拉伸性能、

剪切性能及热物理性能,研究织物结构对实际材料性能的影响规律。针对罩体根部材料与金属连接件热膨胀不匹配问题,设计了氧化铝/石英纤维混编针刺织物,测试混编结构复合材料的相关材料性能。

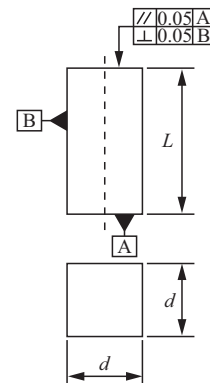
所用针刺织物的布层采用 B 型石英纤维纱制备,网毡采用 C 型石英纤维纱制备,氧化铝纤维氧化铝含量约为  $70\%$ ,二氧化硅含量约为  $30\%$ 。力学测试试样的规格尺寸见图 1。具体数值如表 1 所示。材料的力学强度在万能测试机(深圳三思)上进行,力学试验机符合《GB/T 1446-2005》规定,测试采用位移控制加载,加载速率为  $1\text{ mm/min}$ ,高温测试时加热速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ ,保温时间为  $10\text{ min}$ 。材料的力学强度由破坏载荷除以工作段截面积获得。材料的导热系数依据《GB/T 10295-2008》进行测试。线膨胀系数依据《GJB 332A-2004》进行测试,测试结果为材料在室温至  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内的平均值。材料强度测试设备如图 2 所示。



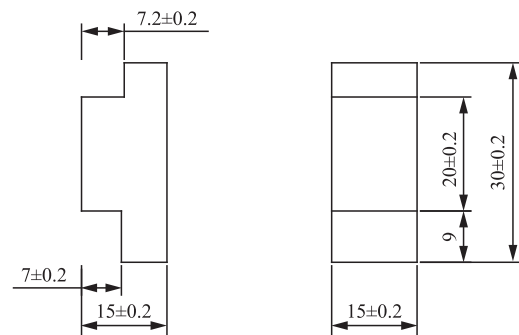
(a) 室温拉伸试样(单位:mm)



(b) 高温拉伸试样



(c) 压缩试样( $d=10\text{ mm}$ ,  $L=25\text{ mm}$ )



(d) 剪切试样(单位:mm)

图 1 测试试样图样

表 1 试样规格尺寸及数值

符号	含义	尺寸/mm
$L$	总长	120
$L_1$	工作段长度	35
$L_0$	标距长度	25
$B$	端头宽度	20
$b$	工作段宽度	10
$h$	厚度	10
$R$	过渡弧半径	25

注:当尺寸 $>10$ 时,尺寸公差为 $\pm 0.1$ ;当尺寸 $>10$ 时,尺寸公差为 $\pm 0.2$ 。



图 2 材料强度测试设备

## 2 测试结果与分析

### 2.1 网毡含量对材料性能的影响

由于针刺结构预制体织物法向没有连续纤维,因此材料的层间性能较差,实际应用中,为了增强罩体的刚度,预制体的根部可通过法向缝合进行增强。在相同的缝合密度下,本文设计了 3 种不同根部结构的雷达罩针刺织物,复合浸渍后进行根部材料性

表 2 不同网毡含量下罩体根部材料性能情况

测试项目	根部 1 层布层加 1 层网毡	根部 2 层布加 1 层网毡	根部纯布层针刺织物
	重复单元针刺织物	重复单元针刺织物	
室温拉伸强度/MPa	25~30	30~40	35~50
室温拉伸模量/GPa	8~12	10~14	12~16
室温面内压缩强度/MPa	80~110	80~110	60~90
室温层间剪切强度/MPa	8~12	6~10	5~8
导热系数/(W/(m·K))	0.4~0.6	0.4~0.6	0.4~0.6

根据不同织物结构天线罩的实际取样测试情况,对于针刺结构天线罩,很难通过织物结构优化,同时提升各项力学性能,实际产品具体采用何种织物形式需结合产品的实际承载情况及极限承载下的破坏形式,针对性地提升对应的材料强度短板。

### 2.2 混编织物结构复合材料性能研究

雷达天线罩的根部通常装配有金属连接件,罩体材料和金属材料在使用环境下的热膨胀系数不匹

能取样测试,测试结果如表 2 所示。

测试结果表明,随着重复单元中网毡含量的降低,罩体根部材料的拉伸强度及模量增加。石英纤维增强二氧化硅复合材料的拉伸性能主要与沿拉伸方向的连续纤维体积含量相关,针刺织物的重复单元由布层及网毡组成,其中网毡主要由无序且纤维体积含量较低的短纤维构成,其对拉伸性能的贡献很小,针刺结构复合材料的拉伸性能主要取决于布层中连续纤维的含量,降低重复单元中网毡的含量,可以提升织物连续纤维的体积含量,从而提升复合材料的拉伸性能。降低重复单元中网毡的含量会减少织物中朝厚度方向转移的纤维数量,从而降低布层间的连接强度,复合材料的层间剪切性能呈下降趋势。从表 2 可知,1 层布层加 1 层网毡结构与 2 层布层加 1 层网毡结构复合材料的面内压缩性能没有明显差异,主要由于相近织物结构下,石英纤维增强二氧化硅复合材料的压缩性能跟基体的致密度更相关,1 层布层加 1 层网毡结构与 2 层布层加 1 层网毡结构复合材料的密度基本接近,因此压缩性能差异性较小,但纯布层结构复合材料的压缩性能低于 1 层布层加 1 层网毡结构与 2 层布层加 1 层网毡结构复合材料,该现象说明,随着网毡含量的进一步降低,材料在承受面内压缩载荷时,沿压缩方向的连续纤维缺乏法向纤维的束缚,材料容易在压力作用下发生层间分离,承压能力降低。与力学性能相比,网毡含量对材料导热性能的影响很小,可能因为随着网毡含量的降低,导热性能较基体更优的纤维的含量尽管增加了,但网毡含量的减少同样减少了法向纤维的含量,从而减少了沿厚度方向的传热通道,在二者的综合作用下,材料的导热性能差异很小。

配容易带来热应力下罩体结构性损坏。对于尺寸较大的天线罩产品,通过增加罩体根部壁厚可以有效降低罩体连接区内壁的温度,较大程度地避免了相关问题。对于小尺寸天线罩产品,通过在根部缠绕隔热层或粘接其他隔热材料也可以降低连接区的温度,但受厚度尺寸的限制,外部隔热层的隔热效果有限,连接区的温度仍可在 300℃ 以上,而且外部隔热层本身会侵占罩体材料的厚度,对罩体根部的强度

带来不利影响,因此还需从织物结构的角度,提升罩体根部材料的热膨胀系数,从根本上缓解罩体根部材料与金属材料的热匹配问题。通过在罩体根部引入热膨胀系数更高的纤维,是提升罩体材料热膨胀系数的有效途径。目前混编纤维针刺结构石英复合材料的性能研究较少,为织物结构的设计带来了难题,为此在保持纤维体积含量、针刺密度等基本一致的前提下,本文设计了不同氧化铝纤维含量的针刺织物,对不同氧化铝纤维含量下材料的性能规律进行了研究。

图 3 是针刺结构氧化铝/石英混编纤维增强二氧化硅复合材料的拉伸强度随氧化铝纤维含量变化情况。

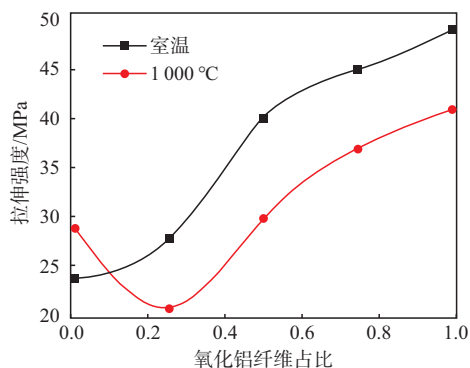


图 3 复合材料拉伸强度随氧化铝纤维含量变化情况

从图 3 可以看出,随着氧化铝纤维含量的增加,混编纤维结构复合材料的室温拉伸强度逐渐增大,这是由于氧化铝纤维的耐温性优于石英纤维,在经历复合材料成型过程中多次高温烧结过程后,氧化铝纤维的残余强度强于石英纤维,因此室温条件下氧化铝含量越高的复合材料拉伸强度越大。与室温下复合材料拉伸性能的变化规律不同,在 1 000 °C 测试条件下,随着氧化铝含量的增多,复合材料的拉伸强度先下降后升高,复合材料拉伸强度的极低值对应氧化铝纤维的含量约为 25%。推测该现象与高温条件下氧化铝纤维与石英纤维热膨胀系数存在明显差异相关,氧化铝纤维的热膨胀系数是石英纤维的 10 倍以上,当氧化铝纤维的含量为 0~25%,高温条件下氧化铝纤维受热膨胀后,复合材料的承载主体为石英纤维,由于混编织物中石英纤维的绝对含量比纯石英纤维织物略低,此时材料的拉伸强度反而下降,高温下氧化铝纤维与石英纤维热膨胀系数不一致引起的热应力还会进一步削弱复合材料的承载能力,使得混编复合材料的综合承载能力低于纯石英纤维复合材料。随着氧化铝纤维的比例进一步增加,复合材料的承载主体逐渐向氧化铝纤维过

渡,混编复合材料的综合承载能力逐渐回升。对比常温和高温的拉伸强度,氧化铝/石英纤维混编复合材料的高温拉伸强度均小于常温拉伸强度,引起该现象的主要原因有:①加入氧化铝纤维后,由于石英纤维和氧化铝纤维的热膨胀系数不同,导致材料内存在热应力,对材料的拉伸强度带来负面影响;②氧化铝纤维的高温强度较室温强度有一定程度地衰减。

图 4 为氧化铝/石英混编纤维增强二氧化硅复合材料的压缩强度随氧化铝纤维含量变化情况,根据材料实际性能测试结果,氧化铝/石英纤维混编针刺结构复合材料的压缩性能受氧化铝纤维的含量影响很小,主要由于在织物参数基本一致的情况下,石英复合材料的压缩性能主要跟基体的致密度相关。图 5 为氧化铝/石英混编纤维增强二氧化硅复合材料的热膨胀系数随氧化铝纤维含量变化情况,随着氧化铝纤维含量的增加,材料的热膨胀系数基本按线性规律增大,实际应用中可根据金属连接件的温度环境,选择合适的氧化铝纤维混编比例。

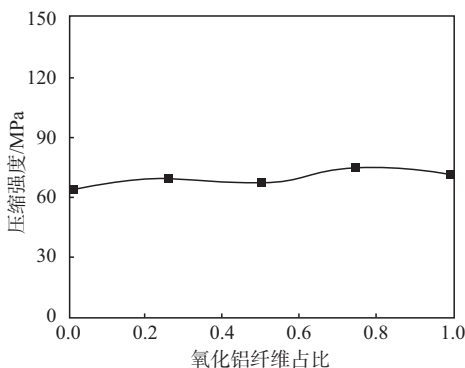


图 4 复合材料压缩强度随氧化铝纤维含量变化情况

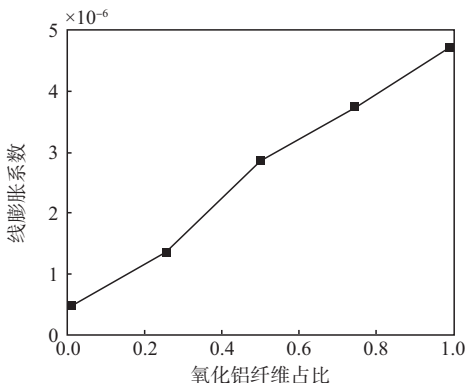


图 5 复合材料线膨胀系数随氧化铝纤维含量变化情况

### 3 结语

针对天线罩对根部材料性能的需求,本文设计了不同结构石英纤维针刺天线罩织物并进行了复合

成型及根部材料性能测试。结果表明,通过减少网毡的含量,根部材料的拉伸性能有所提高,但层间剪切性能略有下降,材料的压缩性能同样受网毡含量的影响。通过在罩体织物根部引入氧化铝纤维,罩体根部材料的热膨胀系数可以在一个较宽的范围内进行调节,氧化铝纤维的含量较低时,石英纤维与氧化铝纤维的热膨胀系数不匹配性会削弱材料的综合承载能力,只有在较高的氧化铝纤维含量下,氧化铝纤维才能发挥其耐高温优势。相关研究可以为针刺结构石英纤维增强二氧化硅复合材料天线罩的设计提供参考,较好解决天线罩在高温使用环境下根部结构强度问题。

### 参考文献

- [1] 雷景轩. 石英纤维增强石英陶瓷复合材料制备研究进展[J]. 陶瓷学报, 2019, 40(3): 277-282.
- [2] 陈虹, 胡利明, 贾光耀, 等. 陶瓷天线罩材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2002, 21(4): 40-44.
- [3] 沈强, 陈斐, 闫法强, 等. 新型高温陶瓷天线罩材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(9): 1-4.
- [4] 张大海, 黎义, 高文, 等. 高温天线罩材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 1-3.
- [5] 杨薇薇, 杨红娜, 吴晓青. 天线罩材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2013(1): 3-8.
- [6] 范叶明, 温广武. 几种新型陶瓷天线罩材料与制备工艺[J]. 热处理技术与装备, 2008, 29(6): 1-5.
- [7] 刘勇. 石英纤维织物结构对二氧化硅基复合材料力学性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] 张剑, 吕毅, 赵英民. 2.5D 衍生结构  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$  复合材料的经向力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2015(4): 87-91.
- [9] 韦鑫, 荆云娟, 尉寄望, 等. 连续纤维增强天线罩预制体技术进展[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(5): 81-84.
- [10] 陈小明, 李晨阳, 李皎, 等. 三维针刺技术研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(5): 185-192.
- [11] 陈小明, 李皎, 张一帆, 等. 回转结构预制体柔性针刺成型系统设计[J]. 纺织学报, 2020, 41(11): 156-161.
- [12] 缪云良. 石英纤维准三维仿形预制件的制备方法: 102995297A[P]. 2013-03-27.
- [13] 缪云良. 仿形立体织物: 201920092607. 5[P]. 2020-01-21.
- [14] 尹锋, 吴桑. 一种由不同密度层构成的针刺预制体及其制备方法: 201910542487. 9[P]. 2019-09-20.
- [15] 刘延友, 程海霞, 乔志炜. 一种密度可调可控的针刺预制体及其制备方法: 201811272773. X[P]. 2020-05-29.
- [16] 胡健明, 缪云良, 钱淑云, 等. 石英纤维准三维结构针刺预制体性能分析[J]. 高科技纤维与应用, 2021, 46(6): 52-56.
- [17] 张春燕, 陈利, 邵明正, 等. 针刺叠层复合材料剥离性能研究[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2017, 34(1): 61-64.
- [18] 杜培健, 王心森, 吕庆涛, 等. 针刺石英机织布损伤表征及针刺毡纤维分布取向的变化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 268-278.
- [19] 雷景轩, 郭浩, 赵中坚, 等. 针刺石英纤维预制体增强石英陶瓷复合材料的制备研究[J]. 玻璃钢, 2018(2): 1-5.

(编辑:徐楠楠)