

## 陶瓷基频率选择表面透波材料工艺研究进展

高贤志<sup>1</sup>, 张 剑<sup>2\*</sup>, 崔凤单<sup>2</sup>, 彭 瑾<sup>1</sup>, 高文博<sup>2</sup>, 吕 毅<sup>2</sup>, 张 昊<sup>2</sup>, 赵英民<sup>2</sup>

(1. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京, 100071; 2. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京, 100074)

**摘要** 频率选择表面(FSS)透波材料是透波材料长期以来所追求的结构-功能一体化的集中体现和成功实践,随着天线以及通讯系统对全向透波、宽频透波、频选透波、隐身等性能要求的提高,该技术已成为透波材料研究的新热点,在军工、民品领域均有广泛的应用前景。陶瓷基 FSS 透波材料技术针对耐高温高性能天线罩的研制需求而提出,对透波材料技术的可持续发展具有重大意义。文中分析了当前陶瓷基 FSS 透波材料工艺研究的需求,介绍了国内陶瓷基 FSS 透波材料工艺研究的现状,并对其应用前景进行了展望。

**关键词** 陶瓷基;频率选择表面(FSS);透波材料;复合材料

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.002

**中图分类号** TB34 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0011-07

### Research into Ceramic-Based Frequency Selective Surface Microwave Transparent Materials

GAO Xianzhi<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2\*</sup>, CUI Fengdan<sup>2</sup>, PENG Jin<sup>1</sup>, GAO Wenbo<sup>2</sup>,  
LYU Yi<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, ZHAO Yingmin<sup>2</sup>

(1. The Third Military Delegate in Beijing Bureau of Naval General Armaments Department, Beijing 100071, China; 2. Aerospace Institute of Advanced Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract** Frequency Selective Surface (FSS) microwave transparent materials are the concentrated expression and successful practice of pursuing a structure-function integration of microwave transparent materials for a long time. With the increasing performance requirements of antennas and communication systems to omnibearing wave transmission, broadband wave transmission, frequency selective wave transmission, stealth, etc., this technology becomes a new hot spot in the research of microwave transparent materials, and has a wide range of applications in the fields of military and civilian products. A ceramic-based FSS microwave transparent material technology is proposed in accordance with the development of high-temperature and high-performance radome, which is of great significance to the sustainable development of microwave transparent material technology. This paper analyzes the current research needs of ceramic-based FSS microwave transparent materials, introduces the current research status of domestic ceramic-based FSS microwave transparent materials, and prospects for its application prospects.

**Key words** ceramic-based; frequency selective surface (FSS); microwave transparent materials; composite materials

**收稿日期:** 2021-06-02

**作者简介:** 高贤志(1978-),男,山东鄄城人,工程师,研究方向为导航控制。E-mail:464979589@qq.com

**通信作者:** 张 剑(1982-),男,河北卢龙人,高级工程师,研究方向为陶瓷基复合材料。E-mail:nksword@163.com

**引用格式:** 高贤志,张剑,崔凤单,等.陶瓷基频率选择表面透波材料工艺研究进展[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(6):11-17. GAO Xianzhi, ZHANG Jian, CUI Fengdan, et al. Research into Ceramic-Based Frequency Selective Surface Microwave Transparent Materials[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 11-17.

天线罩既是飞行器主体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、正常工作的屏障,是一种集透波、防热、承载等功能于一体的结构功能部件<sup>[1-2]</sup>。面向未来战争形态,高速飞行、精准打击、隐身突防已成为新一代飞航武器的基本需求。越来越快的巡航速度带来了严酷的气动环境,导致天线罩的使用温度高达600℃以上,陶瓷基透波材料的应用需求日益增加。天线系统对全向透波、宽频透波、频选透波、隐身等性能要求的不断提高对透波材料的电性能提出了苛刻的要求,简单的半波壁结构很难实现多波段响应也不能特定频段隐身,需要借助于更加复杂的电结构来实现高性能天线罩<sup>[3]</sup>。

频率选择表面(FSS)是金属结构单元组成的单屏或多屏周期性阵列结构,由周期性排列的金属贴片单元或在金属屏上周期性孔隙构成。在单元谐振频率附近呈现全反射(贴片型)或全传输特性(孔隙型),分别称为带阻或带通型FSS。FSS能够对电磁波的通带进行调整,让天线罩实现己方带内雷达波透过、带外雷达波截止的功能,从而有效实现抗干扰与电磁隐身的功能<sup>[4-5]</sup>。FSS透波材料即一种含有FSS结构的人工电磁材料,可以改善或改变天线的电磁性能,是透波材料长期以来所追求的结构-功能一体化的集中体现和成功实践,也是近年来透波材料研究的新热点,有望给透波材料领域带来巨大的变革,在多功能透波、隐身透波构件领域具有广阔的应用前景<sup>[6-9]</sup>。

陶瓷基FSS透波材料主要针对耐高温(600℃以上)高性能天线罩的研制需求而提出。陶瓷透波材料体系可分为纤维增强陶瓷基复合材料与均质陶瓷两大类。为了满足不同的设计使用需求,目前国内的陶瓷基FSS透波材料研究对上述两大类材料都有涉及。本文分析了当前陶瓷基FSS透波材料工艺研究的需求,介绍了国内陶瓷基FSS透波材料研究的现状并对其应用前景进行了展望。

## 1 国外FSS天线罩研究现状

80年代,由于飞行器隐身设计技术得到发展和应用,FSS天线罩技术取得了长足进步。目前,航天、航空领域都在大力开展各种天线罩用FSS材料研究。采用FSS材料研制的隐身天线罩在国外已投入了工程应用,在国内也得到了迅速地发展。<sup>[10]</sup>航空方面,美国轻型喷气运输机C-140、新一代E2“鹰眼”预警机与四代战斗机F-22均使用了FSS天线罩,英国BASE公司的机载雷达罩宣传广告上也

大篇幅地介绍了其在FSS雷达罩方面的设计与制造能力;航海方面,瑞典的维斯比级护卫舰上传感器被FSS天线罩封闭包围,美国LPD-17圣安东尼奥级船坞运输舰用FSS制成了全封闭式的隐身桅杆,俄罗斯现代级导弹驱逐舰上使用了FSS干扰机天线罩。但是,纵观国内外,大量的FSS天线罩研究集中在航空或航海用的树脂基天线罩上,针对高温服役环境的陶瓷基FSS透波材料的宣传报道仅有美国II-VI Optical Systems公司网站上一例(图4),工艺研究更是鲜见报道<sup>[11-13]</sup>。近年来国外公开报道的涉及陶瓷基FSS研究的工作,仅涉及用于X波段应用的全介质带阻FSS<sup>[14]</sup>与基于碳纳米管墨水 and 喷墨打印技术的微波FSS吸收器的研究等<sup>[15,16]</sup>,与陶瓷基FSS天线罩的实际工程应用差距较大。

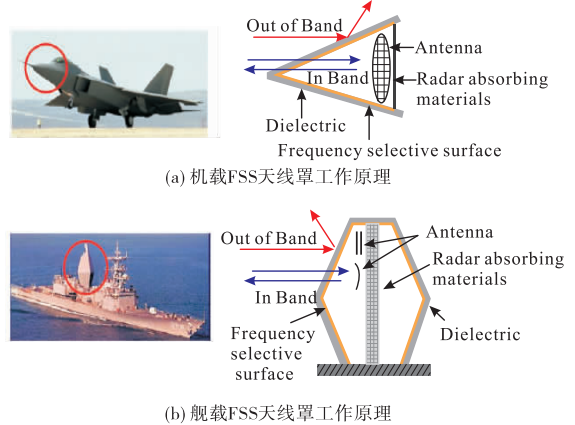


图1 FSS天线罩工作原理示意图



图2 采用FSS隐身技术的美国F-22战斗机与采用隐身桅杆的美国LPD-17船坞登陆舰

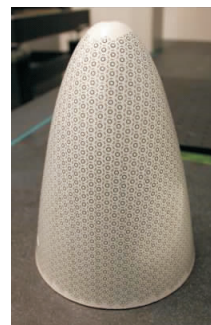


图3 美国II-VI Optical Systems公司研制的陶瓷基FSS天线罩产品

## 2 陶瓷基 FSS 透波材料的工艺需求分析

首先,陶瓷基 FSS 透波材料主要针对耐高温高性能天线罩的需求提出的,对于这样的透波构件而言,为了保护天线正常工作,通常在天线罩结构中还有隔热层的存在。因此,在开展陶瓷基 FSS 透波材料的制备工艺研究时,需要考虑到 FSS 结构处于不同空间位置时的多种结构方案,如图 4 所示。假设这样的陶瓷结构件均可以通过单独制备、层层叠套的工艺组成,则 FSS 结构的制备工艺研究可以简化为在承载层表面制备和隔热层表面制备两类。而隔热层材料表面通常疏松多孔、结构强度差、易变形,通过针对性的设计调整,隔热层表面的 FSS 结构可以由一层隔热层材料与一层含 FSS 结构承载层薄层的组合结构所代替,这样陶瓷基 FSS 透波材料的制备工艺研究仅需围绕承载层材料开展,即可满足全部的结构设计需求。

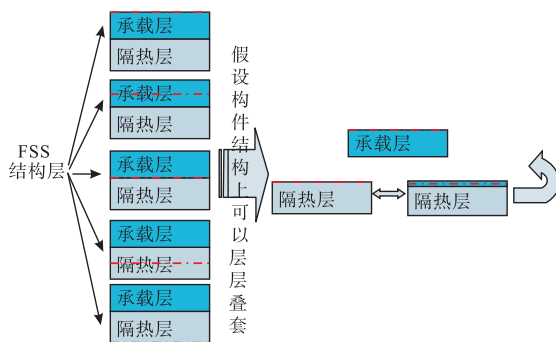


图 4 FSS 结构在不同设计结构中可能的位置及工艺简化

其次,FSS 结构单元图案具体的形状、数量、结构尺寸、相对位置与使用需求和 FSS 设计方案相关,对于工艺研究而言,不断提高陶瓷基 FSS 结构的工艺可实现性,满足日益复杂的电结构设计需求是技术人员的不懈追求。围绕承载层材料开展工艺研究,在承载层内外表面制备 FSS 结构、在承载层内部制备 FSS 结构、准确地制备含多层 FSS 结构的承载层以及制备含 FSS 结构的承载层薄层是当前的几个重要攻关方向。

此外,要实现 FSS 结构的高温使用,必须要保证功能微结构单元在高温气流冲刷、大过载振动等恶劣的使用环境下具有良好的导电性,且能够保持自身结构及相对空间位置的完好。而面向构件应用时,在上述制备工艺研究的全周期内都需考虑到不可展开曲面、狭窄深腔内壁以及大尺寸多层结构构件的工艺实现问题。

## 3 陶瓷基 FSS 透波材料的制备工艺

FSS 实质上是一个开放空间的电磁滤波器,通常是由谐振单元按特定方式排列成的二维平面周期结构。FSS 的滤波特性主要受结构单元的拓扑结构、单元间距、介质层参数(介电常数、介质层厚度)、层叠结构以及入射电磁波的入射角和极化方式等因素影响。从工艺角度看,陶瓷基 FSS 透波材料由透波材料基材与金属化的功能微结构单元组成,其制备过程与陶瓷金属化技术密切相关,类似于三维空间曲面共型电路的制备,只是基材不再是传统的微波介质陶瓷,而是具有承载功能、能够制备大尺寸异型构件的陶瓷基透波材料。而且真实构件中需要的 FSS 表面通常更多地表现为三维曲面和不可展开面,因此,掌握大尺寸不可展开面上制造质量好、精度高的功能微结构单元的能力,是陶瓷基 FSS 透波材料工艺研究的核心。

由于透波材料本身就是一个高度交叉的工程学科,陶瓷基 FSS 透波材料的研究属于高精度微细结构制造与陶瓷金属化技术的有机结合,研究过程中专业交叉现象更为频繁,涉及到物理、化学、材料科学、激光技术、表面科学、仪器设备等多学科交叉,是国内外研究的热点和难点。不同专业背景的研究机构都在各自的专业特长领域发展陶瓷基 FSS 透波材料,因此出现了多种多样的陶瓷基 FSS 制备工艺与方法,其大体可以分为以下 4 类。如表 1 所示。

表 1 陶瓷基 FSS 制备工艺特点比较

制备工艺	主要应用对象	周期	成本	精度	成熟度
膜转移工艺	材料内部制备 FSS 结构	短	较低	较低	低
激光加工技术	材料表面制备 FSS 结构	长	高	高	高
印刷电子技术	材料表面制备 FSS 结构	短	低	较高	高
直接加工技术	材料表面制备 FSS 结构	长	较高	低	低

第 1 类是柔性膜转移工艺,该方法已是树脂基 FSS 材料天线罩大规模使用的通用方法。首先,采用镀膜刻蚀技术在覆铜树脂膜上刻蚀出柔性 FSS 膜,再通过胶膜将其固定在预浸料间,最后升温共固化实现树脂基 FSS 材料的制备<sup>[11-13]</sup>。对于陶瓷基 FSS 材料,柔性膜转移方法也有所尝试。其基本思路是先将功能微结构通过各种手段制备到柔性树脂膜上,再通过熔解等各种手段把陶瓷坯料中的树脂膜去除掉,留下功能微结构与陶瓷基复合材

料<sup>[17-20]</sup>。柔性膜转移法工艺可以实现在曲面上的应用,但是曲面尺寸精度、结构稳定性和耐久性较差,综合运用陶瓷基复合材料的成型工艺技术,是解决膜的可靠去除和功能微结构的完整保留两大问题的关键。

第2类是激光相关加工工艺。该方法又可以细分为激光直接刻蚀与激光微熔覆直写2个方向,是目前研究最多的一类陶瓷基FSS材料制备工艺,各大研究机构都有涉及。激光直接刻蚀是先用涂覆、溅射等各种技术手段先在透波材料基材表面制备一层均匀的金属薄膜或石墨烯薄膜,再采用激光刻蚀工艺直接去除不需要的金属膜层,实现金属层图形化,获得FSS表面或其他功能微结构<sup>[21-23]</sup>。激光微熔覆直写技术,是通过激光选择性微熔覆电子浆料,在树脂、陶瓷等基材上快速制备各种金属以及电阻、电容、电感等元器件,是典型的增材制造技术<sup>[24]</sup>。激光相关加工技术的优势在于高精度地制备构件外表面的FSS结构,其不足之处在于周期长、成本高。

第3类是印刷电子工艺。陶瓷基FSS材料的制备工艺研究大多基于本工艺开展<sup>[25-31]</sup>。印刷电子就是使用丝印、喷印、移印等各种印刷工艺,运用具有导电、介电或半导体性质的墨料低成本地印制功能微结构,再通过共烧结的方法将功能微结构与陶瓷基材融为一体的技术。各种印刷手段对应的设计与场景不同,互为补充。该技术对简单曲面(圆柱曲面、锥体曲面)的适用性较好,但是对大型复杂曲面的直接印刷难度较大。较其他FSS结构制备技术而言,该技术成本低、基材适应性好,其研究的关键在于电子浆料的配方和陶瓷基复合材料的表面处理。

第4类是直接加工工艺,包括配合基材金属化技术的数字化机械加工、金属丝及金属箔的直接成型等。配合溅射镀膜金属化技术的数字化机械加工技术方面,有报道研究了五自由度刻铣机器人加工曲面FSS天线罩的方法,该方法虽可以加工复杂曲面FSS天线罩,但加工系统复杂,成本较高<sup>[32]</sup>。金属丝及金属箔直接成型方面,只能解决特定功能微结构设计实现的问题,其思路是直接将金属丝或功能微结构单元的金属箔预埋到纤维增强织物中,再成型或热压、包埋到成型好的陶瓷基复合材料上,该技术的不足之处在于所面向的场景有限,制造精度低、可靠性差。

#### 4 国内陶瓷基FSS透波材料工艺研究现状

由于FSS透波材料的研究涉及到物理、化学、

材料科学、激光技术、表面科学、仪器设备等多学科的交叉,技术难度较大,国内陶瓷基FSS透波材料的工艺与应用研究远远落后于理论研究。在陶瓷基FSS天线罩工艺研究方面,国内的主要研究单位有航天特种材料及工艺技术研究所、国防科技大学、航天江北机械工程有限公司、山东工陶院、深圳光启研究院、空军工程大学、电子科技大学等。

航天特种材料及工艺技术研究所围绕成熟的熔融石英材料和石英纤维增强二氧化硅( $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ )复合材料,在国内较早地面向各种设计与应用开展了一系列基于不同工艺、面向不同设计结构的陶瓷基FSS透波材料工艺研究。

基于柔性膜转移技术,航天特种材料及工艺技术研究所研究了儿种制备具有FSS结构的纤维增强陶瓷基透波材料及耐高温FSS天线罩的方法<sup>[17-20]</sup>。图5是采用生瓷片丝印FSS图案后,将其成型在石英薄层中得到的FSS夹层结构,通过CT图像可知,烧结后的图案完整未破裂,图案线条连续且清晰可辨,复合材料材料层间结合较好。

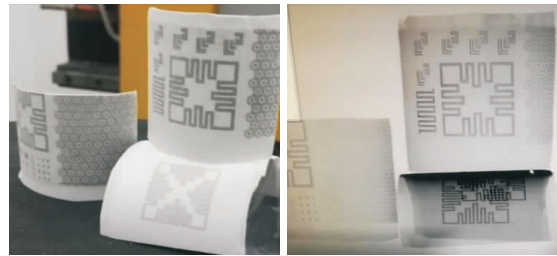


图5 膜转移工艺典型曲面FSS样件

基于激光相关加工工艺,航天特种材料及工艺技术研究所联合大连理工大学研发了一种涂覆刻蚀工艺及其配套设备。该工艺可以实现大尺寸构件内外表面功能微结构的高精度加工。图6为该工艺制备的外表面及狭窄深腔构件内表面带有功能微结构的典型陶瓷基FSS透波材料样件。

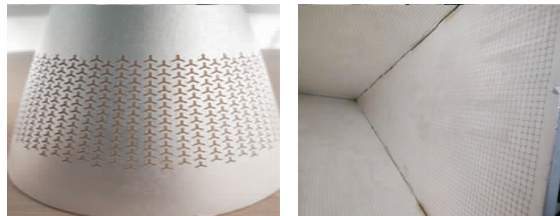


图6 刻蚀工艺制备的外表面及内表面带有功能微结构的典型陶瓷基FSS样件

在陶瓷基FSS透波材料工艺研究方向上,航天特种材料及工艺技术研究所开展工作最多的是印刷电子技术研究,目前已经能够在熔融石英材料以及 $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$ 复合材料表面制备各种高精度耐高温功能微结构(见图7、图8),可用于研制各类耐高温

FSS 天线罩以及耐高温共型天线。使用该技术在陶瓷透波材料表面制备的功能微结构图案的精度能够达到  $50\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $10\sim 20\ \mu\text{m}$ , 方阻为  $10\sim 30\ \text{m}\Omega/\text{sq}$ 。同时, 试验结果表明丝网印刷技术制备的 FSS 结构导电性良好, 能够表现出预期的频率调谐特性且可直接面对  $800\ ^\circ\text{C}$  以上的高温气流冲刷。

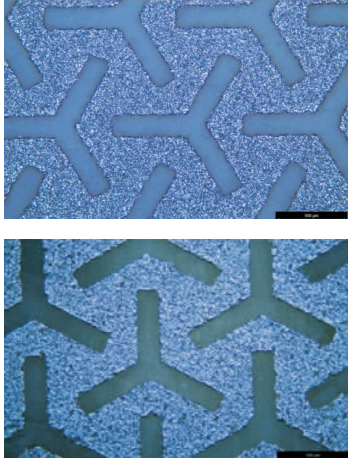


图 7 熔融石英基材(上)及  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  基材(下)表面 FSS 结构的显微图像

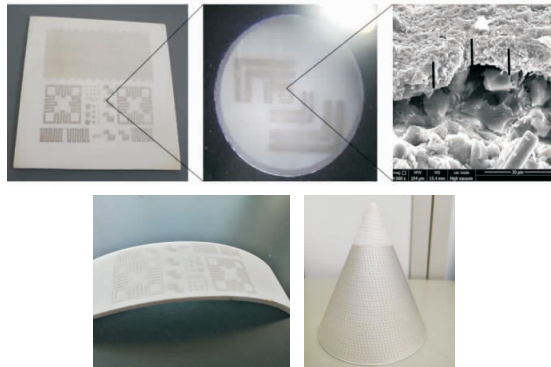


图 8 丝网印刷平面及曲面 FSS 样件

国防科技大学及航天江北机械工程有限公司的陶瓷基 FSS 研究主要围绕纤维增强陶瓷基透波材料开展。

国防科技大学提出了一种基于纤维增强陶瓷基透波复合材料的耐高温 FSS 结构制备方法<sup>[21]</sup>, 据报道, 这种结构可以耐受  $700\ ^\circ\text{C}$  以上的高温。该结构由内至外包括复合材料基体、修饰粘接层和 FSS 结构层三部分。修饰粘接层是低介电常数材料, 采用等离子喷涂工艺制备。FSS 图案层可以是贵金属物理镀层也可以是贵金属浆料涂层, 采用激光加工工艺制备, 尺寸精度优于  $20\ \mu\text{m}$ 。近期, 国防科技大学还提出了一种耐温  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  频率选择透波/隔热/隐身结构及其制备方法, 所述频率选择透波/隔热/隐身结构由内至外依次为隔热层、透波层、频率选择层、陶瓷防护层。FSS 结构的制备工艺主要为铂浆

的丝网印刷工艺, 当图案线宽小于  $0.2\ \text{mm}$  时, 辅以激光刻蚀技术提高图案精度<sup>[22]</sup>。

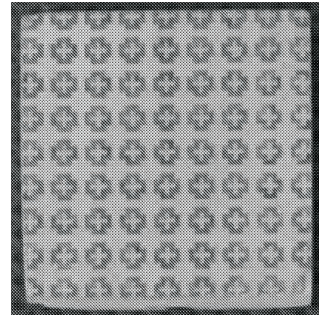


图 9 国防科大制备的 FSS 结构层

湖北三江航天江北机械工程有限公司提出了一种基于石墨烯 FSS 的  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  复合材料频选隐身天线窗口的制备方法。其在  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  复合材料天线窗口的透波内表面通过化学气相沉积处理得到石墨烯膜层, 再将石墨烯膜层通过激光刻蚀, 工艺本质上与金属涂层的激光刻蚀没有区别<sup>[23]</sup>。

山东工陶院、深圳光启研究院、空军工程大学、电子科技大学的陶瓷基 FSS 研究主要围绕均质透波材料开展, 除熔融石英陶瓷和氮化硅基材外, 其他微波介质陶瓷基材的研究与陶瓷基 FSS 天线罩的实际工程应用差距较大。

山东工陶院以多孔氮化物陶瓷材料为多层 FSS 结构透波材料的基体, 以耐高温的金属铂为导电图案材料, 采用丝网印刷工艺用铂浆在陶瓷基体表面直接制备了耐高温的谐振结构, 随后将这种具有 FSS 结构的单层材料通过无机胶黏剂复合为具有多层 FSS 结构的耐高温宽频透波材料, 并对其微观结构和透波性能进行了测试分析。结果表明这种多层复合样件的 FSS 结构在  $9.5\sim 18\ \text{GHz}$  具有  $95\%$  以上的透波率, 与理论设计的透波性能吻合较好<sup>[25]</sup>。此外, 工陶院还使用耐高温导电陶瓷 ( $\text{TiB}_2$  或  $\text{TiN}$ ) 代替铂在多孔氮化物陶瓷表面制备了耐高温 FSS 结构, 其采用的工艺为磁控溅射镀膜加激光刻蚀工艺<sup>[26]</sup>。

深圳光启研究院针对陶瓷天线罩使用需求, 结合熔融石英材料, 开发了多种低温共烧陶瓷 (LTCC) 技术与通过生带连接陶瓷技术相结合的新方法, 以制造夹有耐高温 FSS 层的透波结构。采用该方法制备的透波结构中, FSS 层被嵌在熔融石英陶瓷表面层下加以保护, 而且由于烧结收缩受限, FSS 结构单元的结构尺寸在烧结前后没有发生显著变化, 实测结果与仿真结果一致性较好<sup>[27-29]</sup>。此外, 深圳光启研究院还尝试将天线系统与 FSS 天线罩共同设计, 在宽屏透波的同时, 提高天线的辐射能

力。方案中陶瓷基透波材料包括2层第1陶瓷基板、网格状多个金属微结构以及覆盖于第1陶瓷基板外部,且不同于第一陶瓷基板的第2陶瓷基板,两层基板通过填充液态基板原料或者组装互相连接在一起,微结构通过蚀刻或电镀工艺得到<sup>[33]</sup>。

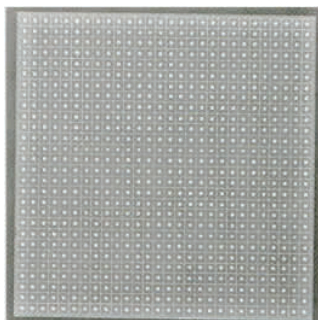


图10 山东工陶院制备的多层FSS复合材料

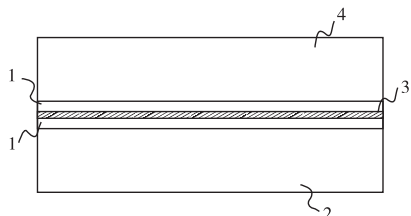


图11 深圳光启研究院的陶瓷基FSS结构样品示意图

电子科技大学主要对X波段陶瓷FSS设计和优化进行了研究,并探索了基于掺杂 $\text{Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ 体系石英陶瓷的高温共烧陶瓷(HTCC)制备工艺,解决了叠层样品分层、起泡、开裂等难题,制备出了可测试的单层及多层陶瓷基FSS透波材料平板<sup>[30-31]</sup>。

空军工程大学提出了一种基于高介低损全介质超材料的双通带频率选择表面,包括双层微波陶瓷结构以及双层微波陶瓷结构之间夹隔的空气层,微波陶瓷结构由刻蚀十字花型孔径结构的微波陶瓷基板与圆柱形介质谐振器构成,圆柱形介质谐振器安装在十字花型孔径结构中央,微波陶瓷基板采用高介低损微波陶瓷材料,通过调节单元结构中央的介质谐振器半径可拓展和优化FSS的带通特性。该材料具有低损耗、高功率容量和耐高温等优点,能够实现在Ku波段的双频段的选通特性,且具有极化不敏感和良好的角度稳定性<sup>[34]</sup>。

## 5 展望

电子印刷技术部分甚至全部取代传统光刻与刻蚀工艺制造轻薄的电子元器件已经成为现实。抛开具体的FSS结构设计方案来看,耐高温FSS透波材料可以抽象为一类表面或内部具有特定耐高温导电图案的耐高温介电材料。基于电子印刷技术的耐高

温FSS透波材料工艺技术可用于在陶瓷透波材料内部或表面制备特定的耐高温导电图案,而这样的金属化的陶瓷材料也将成为包括陶瓷基FSS天线罩、耐高温共形天线在内的耐高温天线系统的材料基础,一旦技术获得突破将快速带动上下游相关行业的发展。

国内面向应用的耐高温FSS透波材料工艺技术研究刚刚起步,尚处于探索阶段,尽管应用前景广阔,但由于其工程化应用需要涉及多个学科的交叉,而且国内研究单位的专业融合度远远不够,大尺寸异型构件的制备工艺并没有实质性突破,质量表征评价技术也显不足,真正实现该材料的工程化应用仍需解决很多关键技术。

## 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] 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.
- [3] 张强. 新型开关型FSS天线罩技术进度[J]. 现代雷达,2017,39(6):1-5.
- [4] 王焕青,祝明,武哲. 频率选择表面简介[J]. 舰船电子工程,2004,24(Z1):301-304.
- [5] 杨帆,张春波,张明秀,等. 基于FSS技术的天线罩电性能设计影响因素研究[J]. 宇航材料工艺,2015,45(4):68-71.
- [6] 杨青真,王红梅,常泽辉. 飞行器隐身技术发展状况[J]. 航天电子对抗,2004(6):55-58.
- [7] 王岩,冯玉杰,刘延坤,等. 隐身技术与隐身材料研究进展[J]. 化学工程师,2006,132(9):43-47.
- [8] 杜新瑜,邓亮,王江枫,等. 雷达智能隐身技术和材料[J]. 安全与电磁兼容,2009,21(1):60-62.
- [9] 陈宇方,马国伟,周永江,等. 智能雷达隐身材料研究现状[J]. 材料导报A:综述篇,2011,25(12):40-44.
- [10] 鲁戈舞,张剑,杨洁颖,等. 频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势[J]. 物理学报,2013,62(19):198401.
- [11] 赵伟,刘建新,赵腾伦. 复合FSS的毫米波“矩形化”通带频率选择天线罩[J]. 现代雷达,2016,38(6):63-70.
- [12] 章欣,张丽娇. 一种夹层频率选择表面复合材料的制备方法:中国,104934721A[P]. 2015-09-23.
- [13] 李长亮. 纤维增强聚合物复合材料频率选择表面设计、特性和应用[D]. 长沙:国防科技大学,2014.
- [14] YUN J,CHOI J. An All-Dielectric Band-Stop Frequency-Selective Surface[J]. Microwave and Optical Technology Letters,2017,59(1):56-60.
- [15] JAISWAR R,MEDEROS-HENRY F,DUPONT V, et al. A Ultra-Wideband Thin Microwave Absorber Using

- Inkjet-Printed Frequency-Selective Surfaces Combining Carbon Nanotubes and Magnetic Nanoparticles [J]. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2019, 125(7): 473.
- [16] JAISWAR R, MEDEROS-HENRY F, DUPONT V, et al. Inkjet-Printed Frequency-Selective Surfaces Based on Carbon Nanotubes for Ultra-Wideband Thin Microwave Absorbers [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(3): 2190-2201.
- [17] 张剑, 崔凤单, 于长清, 等. 一种具有频率选择结构的纤维增强陶瓷基透波材料及制备方法: 中国, 109455924A [P]. 2019-03-12.
- [18] 张剑, 崔凤单, 于长清, 等. 一种具有 FSS 的纤维增强陶瓷基透波材料及制备方法: 中国, 109678476A [P]. 2019-04-26.
- [19] 张剑, 崔凤单, 于长清, 等. 一种具有频率选择的纤维增强陶瓷基透波材料及制备方法: 中国, 109704796A [P]. 2019-05-03.
- [20] 张剑, 崔凤单, 于长清, 等. 一种耐高温频率选择表面天线罩及制备方法: 中国, 109786961A [P]. 2019-05-21.
- [21] 刘海韬, 郝璐, 黄文质, 等. 一种耐高温频率选择透波结构及其制备方法: 中国, 106630979 A [P]. 2017-05-10.
- [22] 刘海韬, 姜如, 黄文质, 等. 一种耐温 1300℃ 频率选择透波/隔热/隐身结构及其制备方法: 中国, 112874044A [P]. 2021-06-01.
- [23] 陈海昆, 李瑞杰, 李川, 等. 基于石墨烯 FSS 的石英复合陶瓷频选隐身天线窗口的制备方法: 中国, 109516825A [P]. 2019-03-26.
- [24] 惠宇, 孙旭东, 李晓东, 等. 一种导热陶瓷基印刷电路板及其制备方法: 中国, 102271456B [P]. 2013-05-01.
- [25] 魏美玲, 王守兴, 王再义, 等. 陶瓷基多层复合频率选择表面材料的研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(5): 23-25.
- [26] 魏美玲, 王守兴, 王重海, 等. 耐高温频率选择表面透波材料及其制备方法: 中国, 104309226 A [P]. 2015-01-28.
- [27] MIAO X, FENG Q, GHEZZO F, et al. Characterization of Radome Materials Comprising LTCC-Derived FSS on a Quartz Glass Plate [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 915: 679-684.
- [28] MIAO X, FENG Q, FENG X, et al. Design, Fabrication and Characterization of Fused Silica-Based Composites with an LTCC-Derived FSS [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 941: 305-309.
- [29] MIAO X, QU Y, GHEZZO F, et al. Fused Silica Ceramics and Composites for Radome Applications [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 900: 123-129.
- [30] 张龙龙. 陶瓷基单屏频率选择表面工艺研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [31] 陈小浪. 陶瓷基频率选择表面的设计与制备 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [32] 吕明云, 祝明, 王焕青, 等. 复杂曲面 FSS 加工系统研究 [J]. *航空学报*, 2005, 26(4): 524-527.
- [33] 刘若珊, 赵治亚, 方小伟, 等. 陶瓷基透波材料及其天线罩和天线系统: 中国, 103682653B [P]. 2018-06-05.
- [34] 余斐, 王军, 屈绍波, 等. 基于高介低损全介质超材料的双通带频率选择表面: 中国, 105206904A [P]. 2015-12-30.

(编辑: 徐楠楠)