

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2019.03.001

石英纤维增强石英陶瓷复合材料制备研究进展

雷景轩

(上海玻璃钢研究院有限公司, 上海 201404)

摘要: 石英纤维增强石英($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$)陶瓷复合材料具有优良的力学、介电、烧蚀和热物理等综合性能,是高速导弹天线罩、天线窗的首选材料。本文从石英纤维增强石英陶瓷复合材料的制备方法、石英纤维织物结构及预处理工艺、循环浸渍及后处理工艺、复合材料防潮处理和复合材料的发展等方面简述了国内外的研究进展,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 石英纤维; 石英纤维增强石英; $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$; 陶瓷复合材料

图法分类号: TQ174.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-2278(2019)03-0277-06

The Research Progress in Preparation of Silica Fiber Reinforced Silica Ceramic Composites

LEI Jingxuan

(Shanghai FRP Research Institute Co. Ltd., Shanghai 201404, China)

Abstract: Silica fiber reinforced silica ceramic composites have excellent mechanical, dielectric, ablation and thermophysical properties, and are the preferred materials for high-speed missile radomes and antenna windows. In this paper, the research progress of silica fiber reinforced silica ceramic composites at home and abroad is summarized from the aspects of their preparation methods, the silica fabric structures and the pretreatment technology, the cyclic impregnation and the post-treatment technology, the moisture-proof treatment of composites and the development of composite materials; the directions of their future development are also analyzed.

Key words: silica fiber; silica fiber reinforced silica; $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$; ceramic composites

0 引言

泥浆浇注熔融石英陶瓷(英文全称Slip-cast Fused Silica, 缩写SCFS, 简称石英陶瓷)是美国乔治亚工学院20世纪60年代研制出的一种天线罩材料^[1]。石英陶瓷因其具有良好的抗热冲击性能、低而稳定的介电常数和损耗角正切值、低的热膨胀系数及制备成本低等优点,广泛应用于超音速导弹天线罩上^[2-4]。

现代化战争的发展要求导弹向着高速、远距、高精度制导、高机动性方向发展,对其配套的天线罩、天线窗及材料提出了更高的耐热、透波、承载等要求。而石英陶瓷的脆性一定程度上限制了其在更高速导弹上的应用。为了改善石英陶瓷的脆性及力学性能的不足,进一步拓展石英陶瓷的应用,在石英陶瓷中引入增韧的连续石英纤维织物作为第二相制备石英纤维增强石英($\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$)复合陶瓷材

料,已成为近年来天线罩材料研究的热点之一^[5-8]。石英纤维增强石英陶瓷复合材料的力学性能较石英陶瓷有显著提高,同时又保留了石英陶瓷良好的抗热冲击性能、低介电常数和低损耗角正切值、热膨胀系数小等优点(见表1)。

1 国外研究进展

早在二十世纪七十年代,为提高石英陶瓷的断裂韧性和可靠性,美国的Philco-Ford公司^[13]采用三维石英纤维织物浸渍硅溶胶工艺,研制出密度为 1.62 g/cm^3 ,介电常数和损耗角正切分别为2.88和0.0061(5.841 GHz)的石英纤维增强二氧化硅复合材料(3D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$),牌号为AS-3DX,并成功应用于中远程的“三叉戟”潜地导弹。在此基础上,美国AMD实验室^[14]又研制出密度为 $1.55\text{--}1.65 \text{ g/cm}^3$ 的

收稿日期: 2018-12-27。

修订日期: 2019-03-21。

通信联系人: 雷景轩(1973-),男,博士,高级工程师。

Received date: 2018-12-27.

Revised date: 2019-03-21.

Correspondent author: LEI Jingxuan(1973-), male, Ph.D., Senior Engineer.

E-mail: wanderer_lei@163.com

表1 石英陶瓷与石英纤维增强石英陶瓷复合材料性能^[9-12]
Tab.1 The properties of the slip-cast fused silica and silica fiber reinforced ceramic composites^[9-12]

Properties	Slip-cast fused silica	2.5D SiO ₂ /SiO ₂ composite	Needled preform SiO ₂ /SiO ₂ composite
Density /g/cm ³	1.90–2.00	1.60–1.80	1.6–1.73
Flexural strength /MPa	50–70	60–150	60–80
Tensile strength /MPa	–	20–90	20–35
Coefficient of linear thermal expansion (≤ 500 °C) / × 10 ⁻⁶ °C	≤ 0.8	≤ 0.6	≤ 0.6
Dielectric constant	3.25–3.35	2.9–3.3	2.9–3.1
Dielectric loss / × 10 ⁻³	≤ 5	≤ 8	≤ 8

4D石英织物增强石英陶瓷复合材料，该材料具有良好的力学性能和介电性能，其断裂应变达到了1.0%，拉伸强度为26 MPa，且介电常数和损耗角正切分别为2.8–3.1和0.006(250 MHz)。

采用电泳渗透法经5个周期对石英织物浸渍硅溶胶，印度Sardar Patel大学的Manocha L等人^[15-16]制备了密度近1.6 g/cm³的石英纤维增强石英复合材料，由于纤维与基体的界面结合强度较高，复合材料的力学性能较差，弯曲强度仅30 MPa左右。

2 国内研究进展

自20世纪80年代中期开始，纤维增强陶瓷复合材料的研究受到世界各国研究人员的高度重视，已成为先进陶瓷研发的热点之一。为了提高石英陶瓷材料的韧性和可靠性，国内以航天材料及工艺研究所、山东工业陶瓷研究设计院、湖北三江航天江北机械工程有限公司、国防科技大学和哈尔滨工业大学等科研院校为代表的研究人员对该材料进行了详尽的研究，在石英纤维增强石英复合材料的制备方法、石英纤维织物结构及预处理工艺、浸渍复合工艺及后处理、复合材料防潮处理及复合材料发展等方面开展了大量的研究工作，并取得了一系列重大突破，研制了具有优良的力学、热学、介电、抗烧蚀等综合性能的SiO₂/SiO₂天线罩及材料，已取得了型号应用^[17]。

2.1 制备方法

目前，石英纤维增强石英陶瓷复合材料制备的工艺方法主要有溶胶-凝胶法(Sol-gel)、液相渗积法(或液相浸渍法)和化学气相渗透法(CVI)三种。溶胶-凝胶法采用石英纤维织物浸渍硅溶胶，通过干燥使硅溶胶凝胶脱水，再多次循环浸渍-凝胶后烧结得到陶瓷复合材料。该工艺可制备复杂形状的大尺寸产品，需反复多次循环浸渍-凝胶后烧成，

具有制备周期较长、工艺较为复杂等特点^[18]。目前绝大多数石英纤维增强石英复合材料都采用这种工艺制备。液相渗积法主要是将配制好的石英料浆浸渍到石英纤维织物中，经过干燥、固化、烧结及最后的致密化处理，得到石英纤维增强石英陶瓷复合材料。该方法具有工艺周期短，致密度高，均匀性好及成本低等优点^[5]，但由于石英颗粒(微米级)相对于溶胶-凝胶后的二氧化硅(< 20 nm)粒子来讲比较粗，其烧结温度相对较高，为兼顾石英纤维强度，复合材料的烧结温度不能太高，导致复合材料强度不高。化学气相渗透法是基于化学气相沉积法发展起来的，气相前驱体随气流流经反应炉内的多孔预制体时，通过对流和扩散等过程向多孔预制体内部转移，在多孔预制体的内部孔隙中沉积生成固体产物。该工艺适合制备纯度较高的沉积物和形状复杂的制品，但由于渗透沉积周期较长，生产过程极为缓慢，且由外向内易产生密度梯度，制备成本也较高^[18]。

刘勇^[17]研究了溶胶-凝胶法制备SiO₂/SiO₂复合材料的力学性能，结果表明，2.5D复合材料结构中经纱存在倾斜角度，降低了复合材料沿经纱方向的力学性能。而复合材料力学性能测试曲线显示出明显的非线性特性，其机理在于石英纤维与基体具有弱界面结合和复合材料内部存在孔隙及微裂纹。陈晨^[19]采用新型石英纤维作为增强体，经浸渍硅溶胶烧结循环4轮制备了2.5D SiO₂/SiO₂复合材料，最佳烧结温度可提升至900 °C，得到的复合材料密度为1.74 g/cm³，介电常数ε为3.19–3.21。董波等^[20]通过控制料浆浓度、真空振动等措施，采用液相渗积法制备了密度可达1.73 g/cm³以上的石英纤维复合材料。贾光耀等^[21]选用纤维体积分数为50%的3D石英织物，采用液相渗积法制备了SiO₂/SiO₂复合材料，经700 °C烧结后，材料的弯曲强度达到78 MPa。中国专

利ZL 02114501^[22]公开了一种化学气相渗透工艺制备石英纤维增强二氧化硅陶瓷复合材料的方法,其介电性能可满足天线罩等航天透波材料的需要。

2.2 石英纤维织物结构及预处理工艺

可设计性是复合材料最大的特点,石英纤维织物选用不同的织物结构和编织参数可得到不同性能的石英纤维增强体织物。常用的石英纤维增强体织物结构有穿刺结构、针刺结构、2.5D结构、三向正交结构等。其中,针刺织物和穿刺织物的价格相对较低,而2.5D织物、三向正交织物具有良好的力学性能,但是制备周期长,制备成本较高,价格偏贵。由于2.5D织物材料中经向和纬向纤维的分布差异决定了复合材料中纬向性能明显高于经向性能,为了提高复合材料的经向力学性能,张剑等^[23]采用法向增强、经向增强及经法向增强等3种2.5D衍生结构织物的增强体,制备了2.5D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料,结果发现1.6 g/cm³密度的经法向增强织物增强复合材料的经向拉伸强度与现有1.65 g/cm³密度的2.5D 复合材料持平,但经向压缩强度接近现有材料的4.3倍。为了满足超薄天线窗的力学性能要求,细编结构设计的织物被用来增强石英复合材料^[24]。

复合材料中纤维与基体界面的结合强度决定着纤维的增韧效果和复合材料的力学性能。为保持石英的拉丝成型和纺织性能,在石英纤维表面往往会涂有一薄层环氧树脂,它的存在会影响复合材料中纤维与基体材料的界面结合强度。因此,需要选用合适的纤维预处理工艺,以去除纤维表面的环氧树脂且最小程度降低对纤维强度的影响。廉云清^[25]对比了热处理和有机溶剂与热处理相结合两种方法对石英纤维处理前后失重变化、SEM、XPS 表面形貌和成分变化,表明采用有机溶剂浸泡与高温处理相结合的表明处理方法优于单纯的高温处理。石英纤维织物预处理的效果会影响基体与纤维的结合,雷景轩等^[11]用丙酮对石英针刺织物进行24 h浸泡,烘干后在450 ℃热处理2 h,完全除去了纤维表面的浸润剂(见图1(a)和(b)),之后经过8~9次循环浸渍-凝胶,在450 ℃烧结2 h后制备了针刺石英纤维增强石英陶瓷复合材料,图1(c)为断口形貌,可以看出纤维与基体结合良好。该材料的弯曲强度、拉伸强度和抗压强度分别为78.5 MPa、31.8 MPa和88.8 MPa,可以满足天线罩材料力学性能的要求。

2.3 循环浸渍及后处理工艺

石英纤维织物浸渍复合效果的好坏将决定复合材料的致密程度,也决定着复合材料的性能。溶胶-凝胶工艺制备 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料周期较长,为了

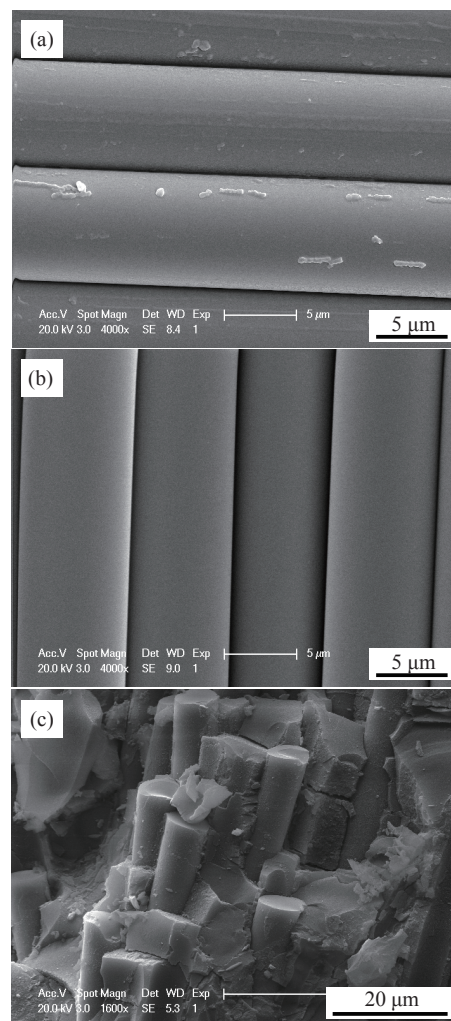


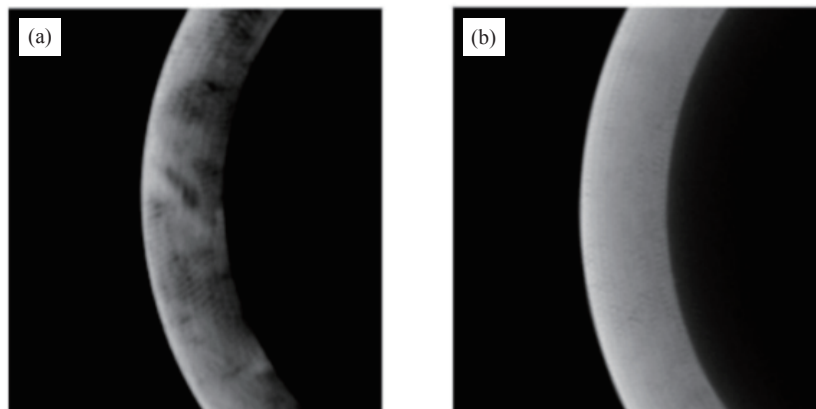
图1 石英纤维布表面状态:

(a)未处理; (b)处理后; (c)针刺复合材料的断口形貌

Fig.1 Photographs of (a) untreated, (b) treated silica fiber and (c) fracture surface of Needled perform $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composite

增强浸渍效果和缩短制备周期,一般需提高硅溶胶浓度,或采用不同浓度硅溶胶优化的浸渍工艺进行浸渍,同时需要辅助真空浸渍、加压浸渍、振动-波动浸渍、整体凝胶等循环浸渍工艺措施^[7,24,26~27,30]。此外,后处理需要采用常规干燥或微波干燥新工艺,通过烧结实现复合材料的制备^[27~28]。

通常市售硅溶胶浓度在20%~30%,采用此浓度硅溶胶浸渍需要经过10次左右的浸渍才能使复合材料密度达到1.6 g/cm³以上。为了提升浸渍效率,宋阳曦^[29]采用70 ℃油浴加热3 h,最终获得二氧化硅含量为42wt.%的硅溶胶。徐道新^[30]研究了硅溶胶浓度对石英纤维增强石英材料的致密化影响,结果发现采用梯度浓度浸渍工艺,可减少浸渍次数和缩短制备周期,五次浸渍后达到了较高的密度1.51 g/cm³,浸渍效率较高。中国专利申请CN 103601479 A^[24]公开了一种制备石英纤维增

图2 工艺方法改进前(a)和改进后(b)的CT照片对比^[27]Fig.2 Comparison of the CT photographs (a) before and (b) after process improvement^[27]

强石英复合材料的方法,分别采用55%–58%硅溶胶、38%–40%硅溶胶和30%硅溶胶浸渍和凝胶经浸渍SAR-9有机硅树脂交联固化、加工、除碳,再浸渍30%的高纯硅溶胶,凝胶后700℃烧结得到了透波区1 mm厚的超薄型天线窗,其材料介电常数为3.12–3.15,天线窗透波率80%以上。

贺光军等^[26]采用抽真空、震动-波动工艺、加压浸渍等多种手段,有效解决了复合石英陶瓷材料致密性(密度大于1.76 g/cm³)和均匀性的问题。中国专利申请CN 105272119 A^[27]发明了一种氧化硅基天线罩复合材料均匀致密化方法,与常规硅溶胶浸渍工艺相比,通过采用改进后的整体凝胶和微波干燥相结合的新技术显著提高了材料的密度均匀性,提升了干燥效率,缩短了材料制备周期。通过CT拍照对比可见,天线罩材料同一高度截面的密度由改进前的 ± 0.06 g/cm³提高至改进后的 ± 0.03 g/cm³,均匀性大幅度提高(见图2)。采用低浓度的硅溶胶反复浸渍,周绍建等^[31]对溶胶-凝胶法制备的SiO_{2f}/SiO₂复合材料加工后试样进行了钝化工艺处理,材料弯曲强度提高了17%,其原因在于钝化处理工艺可以有效地填充切割时在材料表面产生的裂纹,提高材料的力学性能。

2.4 SiO_{2f}/SiO₂复合材料防潮处理

由于SiO_{2f}/SiO₂复合材料中含有20%–30%的气孔,且基体表面含有活性的Si–OH键,导致材料易于从空气中吸水受潮,从而影响材料的介电常数和介电损耗,需要对复合材料进行防潮处理。张健^[32]采用SiO_{2f}/SiO₂复合材料浸渍有机硅树脂和表面涂覆有机涂层的综合防潮方法,保证了SiO₂基复合材料介电性能的稳定性。倪必红等^[34]分析了SiO_{2f}/SiO₂复合陶瓷天线罩罩体的吸潮机理,发现吸潮原因主

要是由表面活性基团和罩体多孔结构引起,通过对某树脂进行改性后,采用真空浸涂和真空固化的工艺方法在复合材料表面制备了防潮涂层,明显提高天线罩的防潮性能,成功应用于型号生产。王盼^[31]研究了聚硼硅氧烷涂层及其涂覆工艺对SiO_{2f}/SiO₂复合材料防潮性能以及力学性能的影响,结果表明,浸渍次数少于3次,综合性能最佳,此时弯曲强度在30 MPa以上,吸水率下降到0.33%。而尹正帅^[32]采用六甲基二硅氮烷对石英复合陶瓷进行烷基化改性,能够极大地改善石英复合陶瓷材料的防潮性能,对介电性能和氧乙炔焰线烧蚀率和粘接性能略有提升,对力学性能基本无影响。

2.5 SiO_{2f}/SiO₂复合材料的发展

为提升SiO_{2f}/SiO₂复合材料的力学性能和抗烧蚀性能,人们在复合材料制备中引入良好抗烧蚀性能的BN。利用溶胶-凝胶法和料浆浸渍法,吕小峰^[36]制备了具有良好的抗烧蚀性能的2D-SiO_{2f}/SiO₂-BN复合材料,其质量烧蚀率和线烧蚀率分别为0.0492 g/s和0.0634 mm/s。采用尿素法结合溶胶-凝胶工艺,李成虎^[37]制备了力学性能和抗烧蚀性明显改善的SiO_{2f}/SiO₂-BN复合材料,同时该材料也具有较好的介电性能和热物理性能。

3 结语

经过近三十年的研究,我国突破了SiO_{2f}/SiO₂复合材料研制和工程应用的一系列关键技术,制备了具有优良力学、介电、烧蚀和热物理等综合性能的复合材料,在天线罩、天线窗上已获得了成功应用。而现代化战争及导弹技术的发展,对天线罩材料提出了更高的要求,SiO_{2f}/SiO₂复合材料作为高速、远距导弹的主流应用天线罩材料,将成为今后一段时间内研究重点,主要集中在以下几个方面:

(1)开发低成本石英纤维增强石英陶瓷材料的制备技术,如开发低成本、高性能的织物编织方法,优化和改进现有的复合工艺等,实现低成本制备石英纤维增强石英复合陶瓷天线罩,拓展 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的应用范围。

(2)开展 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的界面设计和界面结构的调节机制研究,通过对石英纤维表面涂层改性,调控与优化石英纤维与石英陶瓷基体材料的界面结合强度,充分发挥石英纤维的力学性能和提升 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的综合力学性能。

(3)开展高纯耐温石英纤维的开发和性能改进研究,提高石英连续纤维的透波特性和性能稳定性,开发耐温更高的新型石英纤维,提升复合材料性能。

(4)在复合材料制备中引入耐烧蚀的氮化物(如BN等)来提升复合材料的抗烧蚀性能和抗热震能力,开发出长时间抗烧蚀且具有优异的力学性能和电性能的 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 基陶瓷复合材料,满足高速中远程导弹的天线罩使用需求。

参考文献:

- [1]张大海,黎义,高文,等.高温天线罩材料研究进展[J].宇航材料与工艺,2001,(6):1-3.
ZHANG D H, LI Y, GAO W, et al. Aerospace Materials & Technology, 2001, (6): 1-3.
- [2]雷景轩. A夹层石英陶瓷的制备[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1283-1287.
LEI J X. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1283-1287.
- [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.
HAN G F, CHEN Z F, ZHANG L T, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(1): 57-62.
- [4]陈政伟,那伟,景昭,等.石英陶瓷高温熔融工况动态热响应特性试验及仿真研究[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(4): 873-878.
CHEN Z W, NA W, JING Z. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(4): 873-878.
- [5]陈虹,张联盟,李勇,等.三维编织 SiO_2 基复合材料性能的研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(10): 918-922.
CHEN H, ZHANG L M, LI Y, et al. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(10): 918-922.
- [6]赵中坚. 石英陶瓷天线罩无损检测技术研究[J]. 陶瓷学报, 2014, (4): 387-391.
ZHAO Z J. Journal of Ceramics, 2014, (4): 387-391.
- [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: 南京航空航天大学博士论文, 2013.
- [8]马娜,门薇薇,王志强,等. SiBN(C)透波陶瓷纤维研究进展[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(3): 227-232.
MA N, MEN W W, WANG Z Q, et al. Journal of Ceramics, 2015, 36(3): 227-232.
- [9]李仲平. 防热复合材料发展与展望[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 1-9.
LI Z P. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 1-9.
- [10]赖文恩,范锦鹏,张大海,等. 针刺石英纤维增强二氧化硅基透波复合材料性能探讨[A]. 第十八届全国复合材料学术会议论文集(上册)[C]. 2014: 300-304.
- [11]雷景轩,邬浩,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.
LEI J X, WU H, ZHAO Z J, et al. Fiber Reinforced Plastics, 2018, (2): 1-5.
- [12]GJB 8358-2015, 导弹用石英陶瓷天线罩罩体通用规范[S].
- [13]GILREATH M C, CASTELLOW S L. High-temperature dielectric properties of candidate space-shuttle thermal-protection-system and antenna-window materials[R]. NASA TND-7523, Washington: NASA, 1974: 1-53.
- [14]BRAZEL J, FENTON R. ADL-4D6: A silica/silica composite for hardened antenna windows[C]// Proceedings of the 13th Symposium on Electromagnetic Windows, Atlanta, 1976: 9-16.
- [15]MANOCHA L, PANCHAL C N, MANOCHA S. Silica/silica composites through electrophoretic infiltration[C]// 26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: A. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2002, 3(3): 655-661.
- [16]MANOCHA L, PANCHAL C, MANOCHA S. Silica/silica composites through electrophoretic infiltration: Effect of processing conditions on densification of composites[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2000, 9(4): 219-230.
- [17]张大海,李仲平,范锦鹏,等. 热透波材料技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(8): 1-6.
ZHANG D H, LI Z P, FAN J P, et al. Materials China, 2012, 31(8): 1-6.
- [18]韩桂芳,陈照峰,张立同,等. 氧化物陶瓷基复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2003, (5): 8-11, 20.
HAN G F, CHEN Z F, ZHANG L T, et al. Aerospace Materials & Technology, 2003, (5): 8-11, 20.
- [19]陈晨. 新型石英纤维的表征及其石英基复合材料的制备与性能[D]. 长沙: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2014.
- [20]董波,陈达谦,王重海,等. 液相渗积工艺制备致密化纤维复合材料[J]. 现代技术陶瓷, 2012, (1): 8-9.
DONG B, CHEN D Q, WANG C H, et al. Advanced Ceramics,

- 2012, (1): 8-9.
- [21]贾光耀, 陈虹, 胡利明, 等. 三向石英复合材料的研制[J]. 硅酸盐通报, 2002, 21(1): 3-6.
- JIA G Y, CHEN H, HU L M, et al. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2002, 21(1): 3-6.
- [22]陈照峰, 张立同, 成来飞, 等. 一种透波纤维增强二氧化硅复合材料的制备方法[P]. 中国专利: ZL 02114501, 2003-10-15.
- [23]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.
- ZHANG J, LV Y, ZHAO Y M. Aerospace Materials & Technology, 2015, (4): 87-91.
- [24]韦其红, 王重海, 王洪升, 等. 耐高温超薄天线窗的制备方法[P]. 中国专利: CN 103601479 B, 2016-05-18.
- [25]廉云清, 杨杰, 周绍建, 等. $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料中石英纤维的表面处理[J]. 纤维复合材料, 2011, (4): 34-37.
- LIAN Y Q, YANG J, ZHOU S J, et al. Fiber Composites, 2011, (4): 34-37.
- [26]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.
- HE G J, LI P J. Space Electronic Technology, 2006, (S1): 186-192.
- [27]范锦鹏, 张大海, 周军, 等. 一种氧化硅基天线罩复合材料均匀致密化方法[P]. 中国专利: CN 105272119 A, 2016-01-27.
- [28]韩爽, 蒋凯辉, 唐军务, 等. 2.5D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料制备工艺及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, (S2): 458-461.
- HAN S, J K H, TANG J W, et al. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, (S2): 458-461.
- [29]宋阳曦. 二维石英纤维织物增强宽频透波陶瓷基复合材料的制备及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2010.
- [30]徐道新. 3D $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2017.
- [31]周绍建, 廉云清, 杨杰, 等. $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 陶瓷复合材料弯曲性能的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014, (8): 27-30.
- ZHOU S J, LIAN Y Q, YANG J, et al. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014, (8): 27-30.
- [32]张健, 黎义, 张大海, 等. SiO_2 基复合材料的防潮研究[A]. 全国复合材料学术会议 [C]. 2000: 325-329.
- [33]倪必红, 肖志红. 复合陶瓷天线罩表面防潮性能的研究[J]. 航天制造技术, 2006, 2(1): 13-16.
- Ni B H, Xiao Z H. Aerospace Manufacturing Technology, 2006, 2(1): 13-16.
- [34]王盼, 夏龙, 温广武, 等. 聚硼硅氧烷涂层及其涂覆工艺对 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料防潮性能以及力学性能的影响[J]. 涂料工业, 2017, 47(10): 18-22.
- WANG P, XIA L, WEN G W, et al. Paint & Coatings Industry, 2017, 47(10): 18-22.
- [35]尹正帅, 刘义华, 王芬, 等. 烷基化改性对石英复合陶瓷材料性能的影响研究[J]. 航天制造技术, 2015, (5): 23-25, 29.
- YIN Z S, LIU Y H, WANG F, et al. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, (5): 23-25, 29.
- [36]吕小峰. 2D- $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ -BN 复合材料的制备与烧蚀性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2013.
- [37]李成虎. $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ -BN 复合材料的尿素法制备工艺及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2010.