复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第5期 10月 2011年
Vol. 28 No. 5 October 2011

文章编号：1000-3851(2011)05-0058-06

三维夹芯层连织物透波复合材料性能研究

宋元明，李 敏*，王绍凯，顾毅卓，张佐光
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院，空天材料与服役教育部重点实验室，北京 100191）

摘 要： 考察了玻璃纤维三维夹芯层连织物/氰酸酯(CE)复合材料的透波性能，并与夹芯层连织物/环氧树脂复合材料和蜂窝夹层结构复合材料进行了对比。研究发现：实验频段范围内三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的平均透波率高于蜂窝夹层结构复合材料和夹芯层连织物/环氧树脂复合材料；夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波率受电磁波入射角度影响较小，并且在芯柱高度为8 mm时有最大值，平行经向入射的透波率略大于平行纬向入射的透波率，8～12 GHz频率的透波率略大于12～18 GHz的透波率；由于反射作用，面板增强后夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波率下降明显。

关键词： 复合材料；三维夹芯层连织物复合材料；透波率；氰酸酯
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Wave transmission properties of 3D spacer fabric composite

SONG Yuanming, LI Min*, WANG Shaokai, GU Yizhuo, ZHANG Zuoguang
(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education),
School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The wave transmission property of the three-dimensional (3D) glass fiber spacer fabric/cyanate ester (CE) composite was investigated by comparison with the 3D spacer fabric/epoxy composite and the honeycomb sandwich composite. The results indicate that the 3D spacer fabric/CE composite shows better wave transmission property than that of both the spacer fabric/epoxy composite and the honeycomb sandwich composite. Moreover, the wave input angle has little influence on the wave transmission property of the 3D spacer fabric/CE composite, and the spacer fabric/CE composite reveals highest wave transmission property with the pile height of 8 mm. When the wave transmits parallel to the warp direction larger transmission property can be observed than that along the weft direction. And the wave transmission property in the range of 8～12 GHz is better than that of 12～18 GHz. Besides, the facesheet reinforcement decreases the wave transmission property due to the wave reflection.

Keywords: composite; the 3D spacer fabric composite; wave transmission rate; cyanate ester

透波复合材料作为一类功能复合材料，在飞行器天线罩、天线窗等结构上获得了广泛应用，充分保障了飞行器通讯、遥测、制导等无线电系统的正常工作。一般而言，透波复合材料可分为无机和树脂基透波复合材料两类。其中，树脂基透波复合材料克服了无机透波复合材料对于毫米波段强度低、壁较厚等缺点，并且因其优异的力学性能和可设计性，显示出了一定的优势[1-3]。同时，近年来随着介电性能优异的耐热树脂基体的发展，树脂基透波复合材料在高载荷、高飞行速度战术导弹等领域得到了大量应用[4]。

夹层结构因其轻质、高强、透波性好等特点已成为树脂基透波复合材料的重要结构形式之一。目前透波用夹芯材料主要有蜂窝或泡沫材料，泡沫夹芯材料如聚氨酯强度相对低且不耐温，Nomex蜂窝因其优异的综合性能获得了更广泛的应用，在频

收到初稿日期： 2010-09-08；**收到修改稿日期：** 2010-11-24；**网络出版时间：** 2011-05-17 9:08:00
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20110513.1007.001.html
DOI： CNKI:11-1801/TB.20110517.0908.012
基金项目： 国家自然科学基金(50803002)；航空科学基金项目(2008ZE51072)
通讯作者： 李 敏，副教授，从事先进树脂基复合材料的研究 E-mail：leemy@buaa.edu.cn

率选择副反射面、轻型天线结构件等方面开展了大量研究。其中，美国的 Schumm 等和韩国的 Kim 等就频率选择表面进行深入研究，制备了频率选择夹层雷达罩[5-6]；国内的高树理等对微波功能夹层复合材料进行了深入研究[7]，蔡良元等对宽频雷达罩进行了一系列研究，制备了 X－K_a 超宽频雷达罩[8]。

然而传统夹层结构复合材料采用胶接的方式将蒙皮与芯材复合，恶劣的使用环境易引起面层与芯材脱粘。近年来发展的三维夹芯层连织物是一种整体编织而成、层与层之间纱线相连呈中空结构的织物(图 1)，由其制成的复合材料面/芯无剥离[9]，并且夹芯层连织物面层与芯柱均采用玻璃纤维，由其制备透波复合材料具有潜在优势。

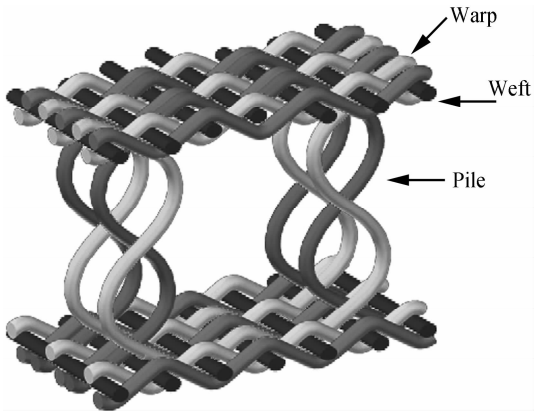


图 1　三维夹芯层连织物示意图

Fig. 1　Structure of 3D spacer fabric

目前，夹芯层连织物复合材料研究多集中在低速冲击、疲劳以及基本力学性能评价[10-13]，而功能特性的研究很少。近年来介电性、工艺性优异的树脂体系得到长足发展，如氰酸酯树脂具有优良的力学性能、耐热及耐湿热性能，在很宽的温度范围和频率范围内稳定且具有极低的介电常数和介质损耗[14]，因此，制备夹芯层连织物透波复合材料已成为一种可能。本文中研究了三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性能，与蜂窝等夹层结构的透波性能进行了对比，并研究了结构参数、面板增强等对透波性能的影响。

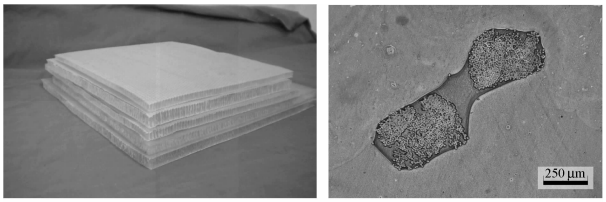
1　实　验

1.1　原材料

玻璃纤维三维夹芯层连织物由常州伯龙三维复合材料有限公司提供，结构参数见表 1；玻璃纤维布(常州伯龙三维复合材料有限公司)；氰酸酯树脂(北京卫星制造厂)，环氧 618 树脂(无锡树脂厂)，593 固化剂(上海树脂厂)；Nomex 蜂窝(北京航空材料研究院)。

1.2　三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的制备

实验配置适当浓度的氰酸酯树脂溶液，将夹芯层连织物浸入溶液一定时间，待溶剂挥发后得到预浸料，将织物预浸料铺放于平板模具上，沿织物面层施加张力以保证面层的平整度和芯柱纤维的垂直性，加热固化得到复合材料。该方法的关键是树脂含量控制、面层平整度和芯柱角度控制。实验制备的夹芯层连织物/氰酸酯复合材料试样如图 2 所示。其中树脂质量分数约为 45%。



(a) Composite specimen　(b) Metallograph of piles

图 2　三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料

Fig. 2　The 3D spacer fabric/CE composite

面板增强夹芯层连织物/氰酸酯复合材料采用真空袋方法制备而成。首先制备玻璃纤维织物预浸料，然后在平板模具上于夹芯层连织物/氰酸酯复合材料上下面层铺放预浸料，真空袋密封，控制真空压力 0.05 MPa，加热固化制得面板增强样品。

表 1　玻璃纤维三维夹芯层连织物结构参数

Table 1　Structural parameters of 3D glass fiber spacer fabric

No.	Height/mm	Warp density/(ends · cm^{-1})	Weft density/(picks · cm^{-1})	Pile distribution density/(piles · cm^{-2})	Fabric area density/(g · cm^{-2})
1	5	9.0	8.0	36	0.09
2	8	7.6	9.0	36	0.11
3	10	8.5	8.5	36	0.12
4	12	8.0	9.5	28	0.13
5	10	8.0	7.5	28	0.10
6	10	8.7	10.0	52	0.14

为制备蜂窝夹层结构复合材料，实验选用与夹芯层连织物面层纤维类型、面密度相同的织物与氰酸酯树脂复合制备面板，利用环氧胶膜与蜂窝芯材复合制备得到蜂窝夹层结构复合材料。

1.3　透波性能测试

透波率测试采用美国安捷伦公司的 E－83638 矢量网络分析仪。所用试样尺寸为 40 cm×40 cm。实验在吸声隔音的环境下进行，信号发生和接收端分别放置于夹层结构复合材料试样中心法线上，位于试样等距离的两端。实验选择在 8～12 GHz 和 12～18 GHz 两个频段，所用三维夹芯层连织物参数如表 1 所示。实验首先测量空白试验即无层板时的电场强度 E_1，然后测量放置层板后的电场强度 E_2，运用下式可以得到透波率 $|T^2|_{dB}$（dB）及转化成百分比透波率 $|T^2|_{\%}$：

$$|T^2|_{dB} = 20\lg\frac{E_2}{E_1} \tag{1}$$

$$|T^2|_{\%} = 10^{\frac{|T^2|_{dB}}{10}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 dB 为一种计数的方式。

实验对比了夹芯层连织物/氰酸酯复合材料与夹芯层连织物/环氧树脂复合材料及蜂窝夹层结构复合材料的透波性能，同时考察了不同芯柱高度、芯柱密度的夹芯层连织物的透波性能，并测试了面板增强、入射角度和极化方向对夹芯层连织物/氰酸酯复合材料透波率的影响。

1.4　力学性能测试

平压性能采用 GB/T 1453－2005 标准进行测试，剪切性能采用 GB/T 1455－2005 标准进行测试。

2　结果与讨论

2.1　不同夹层结构复合材料的透波特性

5 mm 和 12 mm 三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料及等厚度夹芯层连织物/环氧树脂复合材料和蜂窝夹层结构复合材料的透波性能如图 3 所示。

由图 3 可知，在实验频率范围内，12 mm 夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的平均透波率为96.5%，而等厚度蜂窝夹层结构复合材料为 94.7%；5 mm 夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的平均透波率为 97.4%，而等厚度蜂窝夹层结构复合材料为 95.7%。这表明与蜂窝夹层结构复合材料相比，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性略优。同时，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料和蜂窝夹层结构复合材料在测试频段内透波率均大于夹芯层连织物/环氧树脂复合材料，其中夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的平均透波率达到 95%以上，而环氧树脂复合材料只有 77.1%。这主要是因为氰酸酯树脂的介电性能优于环氧树脂，通常环氧树脂的介电常数为 3.7，氰酸酯树脂为 2.8～3.2。上述结果表明，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料作为透波材料具有天线罩等结构的应用潜力。

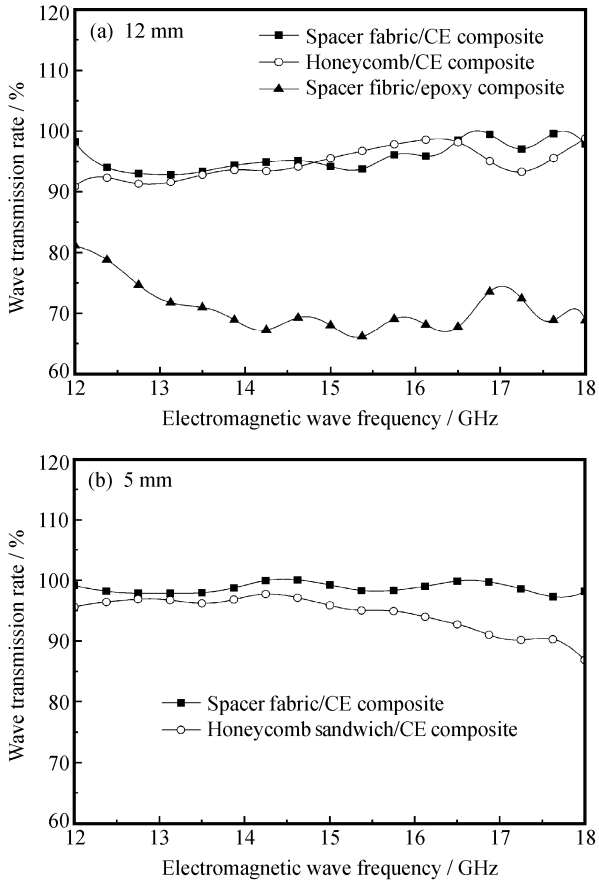


图 3　不同类型的夹芯复合材料的透波性能

Fig. 3　Wave transmission property of different types of sandwich composites

2.2　结构参数对透波性能的影响

不同芯柱高度的夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性能如图 4 所示。

不同芯柱高度的透波性能基本相当，只有 8 mm夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性能略有增加。这可能与芯柱形态有关，通常 8 mm 以上的织物芯柱呈“8”字形；而当芯柱高度较小时，树脂容易富集，芯柱呈一根较粗的杆，如图 5 所示，此时不利于电磁波透过。8～12 GHz 的平均透波率略高于 12～18 GHz 的平均透波率。对于不同的电

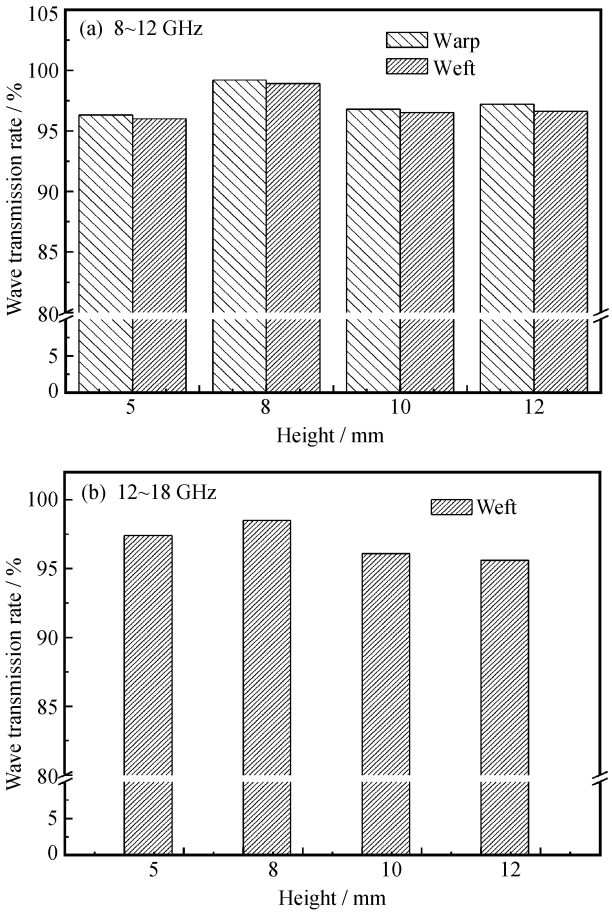


图 4　芯柱高度对夹芯层连织物/氰酸酯复合材料透波率的影响

Fig. 4　Influence of pile height on the wave transmission property

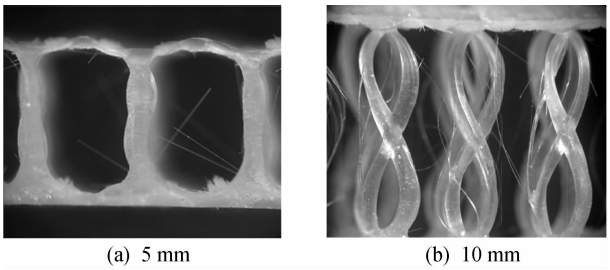


图 5　不同芯柱高度复合材料的芯柱经向截面图[9]

Fig. 5　Pile cross sections of 3D spacer fabric composites with different height in the warp direction[9]

磁波入射方向，电场平行于经向入射时的透波率略大于电场平行于纬向入射时的透波率，而芯柱密度对透波率影响不大，如图 6 所示。

2.3　面板增强层对透波性能的影响

10 mm 芯柱高度面板增强夹芯层连织物/氰酸酯复合材料透波性能如图 7 所示。面板增强后夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性能明显下降，并且在 14.5 GHz 左右透波率有极小值。这是由于在电磁波入射过程中，面板层有一定的反射作用。

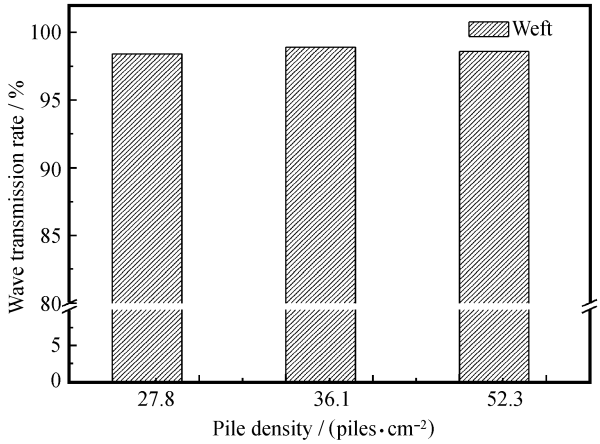


图 6　芯柱密度对夹芯层连织物/氰酸酯复合材料平均透波率的影响(8～12 GHz)

Fig. 6　Influence of pile distribution density on the wave transmission property in 8～12 GHz

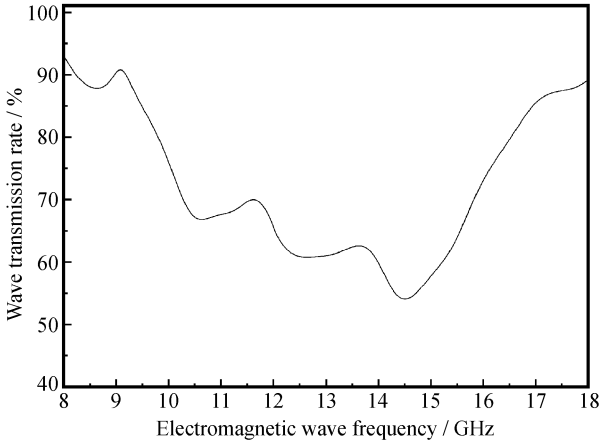


图 7　面板增强夹芯层连织物/氰酸酯复合材料透波性能曲线

Fig. 7　Wave transmission property of facesheet reinforced spacer fabric/CE composite

面板较薄时，反射作用较小，因而对电磁波透波率影响不大；面板增厚时，反射作用增强，因此面板增强后复合材料的透波率会下降明显。

2.4　入射角度的影响

电磁波采用 0°、30°、45° 方向入射时，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波率如图 8、9 所示。

可以看出，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料和蜂窝夹层结构复合材料的透波率受角度影响较小；面板增强后，透波率随角度增加下降明显。这是因为，当面板层很薄时，电磁波反射很少，因而对角度变化不敏感；当面板增强变厚时，反射增强，随着角度变化，透波率呈明显下降趋势。

2.5　夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的力学性能

实验考察了不同芯柱高度的夹芯层连织物/氰

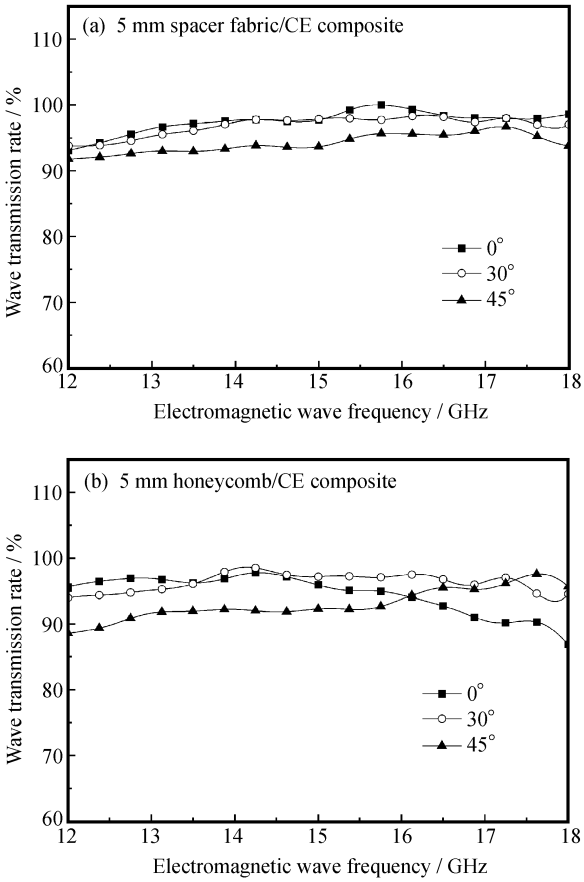


图 8　不同入射角度复合材料的透波性能

Fig. 8　Wave transmission property of composites under different input angles

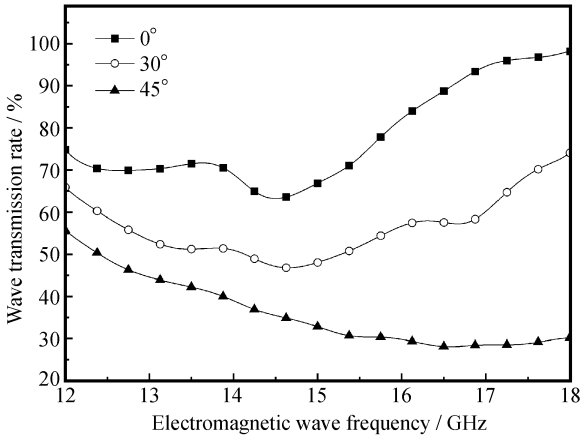


图 9　不同入射角度面板增强夹芯层连织物/CE 复合材料的透波性能

Fig. 9　Wave transmission property of facesheet reinforced spacer fabric/CE composites under different input angles

酸酯复合材料的平压和剪切性能，并与蜂窝夹层结构进行了对比，如表 2 所示。

结果表明：夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的平压强度和剪切强度随芯柱高度的增加而下降，其平压强度略大于蜂窝夹层结构复合材料；8 mm 芯柱高度的夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的剪切强度与蜂窝夹层结构相当。

表 2　夹芯层连织物/氰酸酯复合材料及蜂窝夹层力学性能

Table 2　Mechanical properties of spacer fabric/CE composite and honeycomb sandwich composite

	Flatwise compressive strength/MPa	Shear strength/MPa	
		Warp	Weft
Spacer fabric/CE composite with 5 mm piles	5.12	1.27	2.08
Spacer fabric/CE composite with 8 mm piles	4.79	0.65	1.49
Spacer fabric composite/CE with 10 mm piles (Table 1 No. 3)	2.03	0.37	0.60
Honeycomb sandwich composite	1.84	0.67	1.18

3　结　论

（1）对比不同类型夹芯结构复合材料发现，夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波性能略优于蜂窝夹层结构复合材料，与夹芯层连织物/环氧树脂复合材料相比其透波性能有了较大提高。

（2）实验范围内，透波率随夹芯层连织物/氰酸酯复合材料芯柱高度增加先升后降，与芯柱密度关系不明显。电场平行于经向的透波率略大于平行于纬向的透波率，8～12 GHz 频率的透波率略大于 12～18 GHz 的透波率。采用面板增强后夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波率下降，并且存在最低值。

（3）实验范围内，三维夹芯层连织物/氰酸酯复合材料的透波率受角度影响较小；面板增强后，透波率随角度增加下降明显。

参考文献：

[1]　刘　丽. 天线罩用透波材料 [M]. 北京：冶金工业出版社，2008：1－10.

[2]　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)：30－31.
Yuan Haigen, Zhou Yuxi. Progress in research of wave

transmission materials [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2006, 4(5): 30 - 31.

[3] 宋长文. 树脂基透波复合材料研究进展 [J]. 塑料工业, 2007, 35(10): 1 - 4.
Song Changwen. Progress in research of electro - magnetic wave penetrating polymer-matrix composite [J]. China Plastic Industry, 2007, 35(10): 1 - 4.

[4] 李春华，齐暑华，张　剑. 树脂基电磁透波复合材料研究进展 [J]. 塑料工业, 2005, 33(8): 5 - 6.
Li Chunhua, Qi Shuhua, Zhang Jian. Progress in research on electro - magnetic wave penetrating polymer-matrix composite materials [J]. China Plastic Industry, 2005, 33(8): 5 - 6.

[5] Schumm J W, Cunningham H M, Cave C A. The Bode Checks solution: A high throughput analysis software combining Gene Mapper ID, FSS - I, LIMS and artificial intelligence [J]. Forensic Science International: Genetics Supplement Series, 2008, 1(1): 125 - 127.

[6] Kim P C, Lee D G, Seo Il S, Kim G H. Low - observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(9): 2163 - 2170.

[7] 高树理. 微波功能复合材料的应用与发展 [J]. 航空制造技术, 2004(7): 49 - 59.
Gao Shuli. Application and development of microwave function composite [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(7): 49 - 59.

[8] 蔡良元. 王青海，张　强. 覆盖 X 波段到 K_a 波段的超宽带天线罩 [J]. 宇航材料工艺, 2010(2): 37 - 40.
Cai Liangyuan, Wang Qinghai, Zhang Qiang. Fabrication of ultra - wide band radome from X - band to K_a- band [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010(2): 37 - 40.

[9] 高爱君，李　敏，王绍凯，等. 三维间隔连体织物复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报, 2008. 25(2): 87 - 93.
Gao Aijun, Li Min, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of 3D spacer fabric composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 87 - 93.

[10] 匡　宁，周光明，张立泉，等. 三维中空复合材料力学性能研究 [J]. 材料工程, 2007(z1): 117 - 120.
Kuang Ning, Zhou Guangming, Zhang Liquan, et al. Investigation on mechanical properties of 3D sandwich woven composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(z1): 117 - 120.

[11] 庄桂增，孙志杰，王绍凯，等. 三维间隔连体织物泡沫夹层结构复合材料的基本力学特性 [J]. 复合材料学报, 2009, 26(5): 27 - 31.
Zhuang Guizeng, Sun Zhijie, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the basic mechanical characteristics of foam filled 3D spacer fabric composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 27 - 31.

[12] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani J. Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets [J]. Composite Structures, 2005, 69(2): 167 - 181.

[13] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Dynamic compression behavior of integrated core sandwich composites [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 445/446: 54 - 64.

[14] 李　超，刘建超，陈　青. 航天透波复合材料的研究进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(6): 38 - 39.
Li Chao, Liu Jianchao, Chen Qing. The research of aerospace wave transparent composite [J]. High Tech Fibre and Application, 2003, 28(6): 38 - 39.