

轻质蜂窝夹层复合材料的制备及其吸波性能研究

赵彦凯 毕 松 侯根良* 刘朝辉 李 浩 宋永智

(火箭军工程大学 304 室,西安 710025)

摘 要 研究并制备出吸波性能优异的轻质导电炭黑/聚氨酯树脂(CB/PUR)芳纶蜂窝夹层复合材料。将导电炭黑分散至聚氨酯树脂中,得到 CB/PUR 浆料,采用浸渍法制备了轻质 CB/PUR 蜂窝夹层复合吸波材料。利用扫描电子显微镜对制备的轻质 CB/PUR 芳纶蜂窝夹层复合吸波材料进行微观结构表征,研究增重量和双层结构对吸波性能的影响。结果显示,一定增重量下,双层结构时,复合材料表现出优异的微波吸收性能。

关键词 轻质,芳纶蜂窝夹层复合材料,浸渍法,双层结构,微波吸收性能

中图分类号 TB332

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2021)05-0093-04

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.021

Preparation and microwave absorption property of lightweight honeycomb sandwich composite

Zhao Yankai Bi Song Hou Genliang Liu Zhaohui Li Hao Song Yongzhi

(304 Teaching and Research Section, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025)

Abstract Light CB/PUR honeycomb sandwich composites with excellent absorbing properties were prepared. CB/PUR paste was formed by dispersing conductive carbon black into waterborne polyurethane resin. Light CB/PUR honeycomb sandwich composite absorbing material was prepared by impregnation method. Scanning electron microscope (SEM) was used to characterize the microstructure of the absorbing material, and the effects of weight gain and the number of layers of the composite on the absorbing property were studied. The microstructural analysis showed that CB/PUR impregnated layer was closely bound to the honeycomb wall, and the impregnated layer thickness of the absorbing material under 10%, 20% and 30% weight increase was 20~30 μ m, 40~45 μ m, 50~60 μ m, respectively. The absorbing material was successfully composite. The results of microwave reflectivity test shown that the absorbing material had no obvious absorbing ability when the weight was 30%, but the absorbing material coating had excellent microwave absorbing performance when the weight was 10% and 20%, and when the structure was double layer. When the weight was 20% and the double-layer structure was built, the coating shown the best absorbing performance, with the maximum absorbing strength of -16dB and effective absorbing bandwidth of 18GHz, which covered the whole measurement frequency band, and shown excellent broadband absorbing performance. In addition, when the weight was increased by 10%, the double layer structure also realized the radar wave measurement frequency band of 13GHz absorption.

Key words light, honeycomb sandwich composite, impregnation method, double layer structure, microwave absorption property

作为典型的结构型吸波材料,芳纶蜂窝夹层复合吸波材料广泛应用于军事和民用领域。芳纶蜂窝结构是一种仿生结构,由芳纶纸浸胶制备而成,与天

然蜂巢相似,不仅质量轻还具有高抗压强度、高刚度等特点,是优异的轻质高强结构材料,因而被广泛用作夹层结构的夹芯^[1-5]。芳纶蜂窝夹层结构吸波材

收稿日期:2020-12-03;修回日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51502341)

作者简介:赵彦凯(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为蜂窝夹层复合吸波材料,E-mail:1429263210@qq.com。

通讯作者:侯根良,副教授,硕士研究生导师,主要从事新型材料研究,E-mail:houdenliang@126.com。

料由经过浸渍的芳纶纸蜂窝(吸波蜂窝)和透波面板组成,兼具优良的力学性能和吸波性能,其中经过浸渍的芳纶纸蜂窝由蜂窝芯材和吸波涂层两部分组成,透波面板起到调节阻抗匹配和增强力学性能的作用,阻抗匹配使电磁波尽可能多的进入到蜂窝结构中去,入射电磁波在具有吸波性能的蜂窝内壁之间多次反射、吸收,实现了芳纶蜂窝夹层结构材料对电磁波的宽频带吸收^[6-10]。芳纶蜂窝结构在航空航天领域多用于飞机的机翼、尾翼等处,美国 B-2 轰炸机的机身表面和机翼处大部分是由芳纶蜂窝夹层结构材料制成的^[11]。

就芳纶蜂窝夹层复合吸波材料而言,其吸波性能主要取决于蜂窝本身的规格尺寸以及浸渍胶液体系^[12]。Wu 等^[13]采用周期边界条件有限元法研究了三维蜂窝结构吸波材料的吸波性能,在 ku 波段电磁波的作用下,蜂窝结构吸波材料在高度为 6mm,浸渍层厚度为 0.2mm,吸波效能可在 20dB 以上的带宽可达 13~18.8GHz。He 等^[14]采用喷雾法制备了金属磁性微粉包覆蜂窝夹层结构的雷达吸波材料,在 5mm 厚度下的蜂窝夹层复合材料增重量为 65%时,在 2.6~18GHz 内实现反射损耗小于 5dB(70% 的功率吸收)。Khurram 等^[15]在 20mm 厚度芳纶蜂窝材料上涂满了热塑性树脂,其中填充了碳粉作为有损耗填料,结果表明在增重量为 10% 时显示出 18GHz 的吸收带宽,最大吸收强度为 7dB(80%)。Luo 等^[16]采用浸渍法制备了包覆环氧树脂、填充导电炭黑作有损填料的孔径蜂窝芯。结果显示,8mm 厚度的芳纶蜂窝材料,浸渍层厚度为 25 μ m 时在 5~18GHz 的频率范围内,RL 值低于 -10dB。在 6~18GHz 范围内,RL 值可以达到 -15dB。Zhou 等^[17]用导电炭黑(非磁性)和聚酰亚胺(PI)溶液浸渍芳纶纸框,制备了吸波蜂窝复合材料,结果显示,5mm 厚度下蜂窝复合材料浸渍层厚度为 0.2mm 时,整个 8~12GHz 频段的反射率值均小于 -10dB。现有研究表明,磁性吸收剂包覆的蜂窝夹层复合材料增重量较大,导电炭黑包裹的复合材料更利于轻质复合材料的实现,但用炭黑包裹的蜂窝夹层复合材料频宽有待进一步拓宽。

以导电炭黑/水性聚氨酯树脂作为吸收剂,通过浸渍法浸渍 5mm 厚芳纶蜂窝夹层材料,制备了 3 种不同增重量(10%、20%、30%)的芳纶蜂窝夹层复合吸波材料,研究了增重量对蜂窝夹层复合材料吸波性能的影响;同时,探究了双层结构对蜂窝夹层复

合材料吸波性能的影响,确定了蜂窝夹层复合吸波材料的理想参数。最终,制备出轻质、宽频的蜂窝夹层复合吸波材料。另外,还对 CB 吸波材料与 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料的吸波性能做了对比。

1 实验部分

1.1 材料

导电炭黑(CB)、芳纶蜂窝芯(Nomex,300mm $\times$ 300mm $\times$ 5mm)、水性聚氨酯树脂(NL-236,30%),武汉磁电公司;水性润湿分散剂(SP-712)、水性消泡剂(SP-852),泰达化玻公司;去离子水,自制。

1.2 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料的制备

将 4g 导电炭黑加入到 80g 水性聚氨酯树脂中,而后加入 200g 去离子水,30 $^{\circ}$ C 水浴搅拌,此时胶液颜色为墨绿色。搅拌过程中加入 10g 分散剂,使其混合均匀,1min 后,加入 10g 去泡剂,去除搅拌产生的气泡。搅拌 30min 后,将胶液取出,对其超声振荡 30min,此时胶液颜色为黑色,继续对溶液搅拌 15min 后取出,此时胶液即为浸渍胶液。将浸渍胶液倒入浸渍槽中,在浸渍槽中放置芳纶纸蜂窝浸渍 20min,期间用镊子左右轻微移动,以保证浸渍完全。1min 后取出经过浸渍的芳纶纸蜂窝放置到镂空的不锈钢网上,室温晾晒 1min,放入干燥箱中升温到 120 $^{\circ}$ C,保温 1h 进行预固化。预固化过程中,每隔 1min 翻面 1 次,以避免胶液在蜂窝壁上呈梯度分布,翻面 4 次后,预固化完成。最后放入干燥箱升温到 180 $^{\circ}$ C,并保温 1h 完成最后固化,此时的蜂窝芯即为蜂窝芯吸波样品。未达到增重标准,重复上述操作,通过浸渍次数(2,3,4)控制增重量制备出 3 种样品。

1.3 测试

利用扫描电子显微镜(SEM,S-4800 型,日本日立公司)对蜂窝壁吸波涂层进行表征;采用弓形框法对制备的吸波蜂窝芯进行反射率测试,仪器型号为 CEYEAR 3672C 型。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图 1 为 CB 粉末、空白芳纶蜂窝材料和 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料(增重量为 10%、20%、30%)的 SEM 图。空白芳纶蜂窝材料中存在孔为正六边形的板状结构。由图可见,CB 粉末呈现蓬松多孔状态,且彼此连成一片,形成导电区域,且出现

团聚现象,呈“石榴”状形成导电链,粒径大约为40~50nm,CB粉末良好的导电性和小尺寸效应及其多孔结构都为其提供了良好的吸波通道。增重量为10%时,浸渍层厚度为20~30 μm ,CB/PUR浸渍层与蜂窝壁紧密结合,厚度较为均匀。当增重量为20%时,浸渍层厚度为40~45 μm ,浸渍层与蜂窝壁之间有十分明显的界线。增重量为30%时,浸渍层厚度为50~60 μm 左右,分布较为均匀。与单纯的CB/PUR吸波涂层相比,浸渍层紧紧地包裹住轻质蜂窝壁,使蜂窝复合吸波材料既能有良好的吸波性能,又能够减轻自身的质量。同时,浸渍层在蜂窝壁上,能够衰减和吸收反射而来的电磁波,为吸波材料增加了吸波通道,使得吸波材料的吸波效果进一步增强。

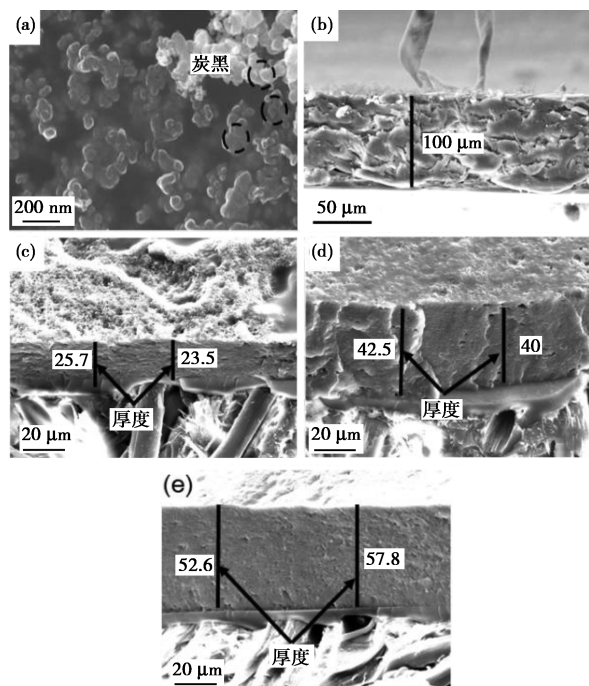


图1 CB粉末(a)、空白芳纶蜂窝材料(b)和CB/PUR蜂窝夹层复合材料(增重量为10%、20%、30%,c-e)的SEM图

本实验进一步分析了CB/PUR蜂窝夹层复合材料增重量与厚度之间的关系,结果发现增重量与浸渍层厚度基本上呈线性变化。

2.2 吸波性能分析

根据能量守恒定律,电磁波入射任意形状的吸波材料,电磁波在界面上都会发生反射、折射和吸收现象^[18-22]。影响材料吸波性能的因素主要有阻抗匹配特性和材料的电磁衰减能力。

图2为CB/PUR的电磁参数及反射率变化趋

势图。由图可见,CB/PUR的介电常数实部(ϵ')在5~10之间,介电常数虚部(ϵ'')在2~4之间;磁导率实部(μ')和磁导率虚部(μ'')接近于0。说明导电炭黑电性能远高于磁性能,其对电磁波的损耗主要为电损耗。另外,CB吸波涂层在1.0mm、1.3mm、1.7mm的厚度下吸波效果均不明显;在2mm厚度下,其在Ku波段有一定的吸波效果,吸波频段范围大约为3GHz,但在其他波段吸波效果也不明显。由此可以得到,随着厚度的增加,CB/PUR阻抗匹配性能随之增强,对材料的吸波性能有一定的促进作用,但厚度的增加并不符合当今吸波材料“轻、薄”的发展需求。将其与轻质蜂窝夹层材料复合既能使CB/PUR增加吸波通道,促进吸波性能的提升,又能发挥蜂窝夹层材料的优势,使得轻质蜂窝夹层复合吸波材料兼具吸波承载于一体。

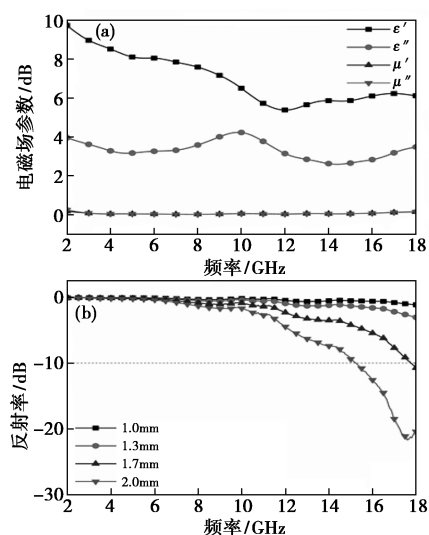


图2 CB/PUR的电磁参数(a)及反射率(b)变化趋势图

图3为CB/PUR蜂窝夹层复合吸波材料的反射率变化趋势图。由图可见,在单层蜂窝芯的条件下,增重为10%时,其在X、Ku波段都具备吸波效果,最大峰值达到-18.9dB,吸波频带大约为10.9GHz。增重20%时,其吸波效果相比10%有很大增强,最大吸波强度达到-42.3dB,吸波频带(11.2GHz)略有拓宽。增重30%时,X波段没有吸波效果,吸波频带(9GHz)减少,在Ku波段具有吸波性能;复合材料在低频的吸波效果不好,可能与CB的电性能过强有关。而在双层蜂窝芯的条件下,增重20%时,其在低频吸波效果最佳,实现了4.5~18GHz频段的吸收,最大峰值为-45.6dB;增重30%时,在低频波段具有吸波效果,但吸波强度不

佳。由此可以得到,蜂窝结构双层的结构设计一定程度上促进了吸波材料对电磁波的衰减与吸收。相对于单层结构,其吸波频段向低频移动,但高频吸波效果反而不佳,可能与其双层结构有关,其拓宽了吸波频带,但同时电参数进一步增高,反而对吸波损耗不利。通过以上分析得出结论,在轻质 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料中,增重 20%,可以得到吸波效果较好的复合吸波材料,且随着增重的增加,其吸波频带左移,但吸波效果随之减弱。同时,双层结构设计比单层结构更有利于提高复合吸波材料的吸波性能。

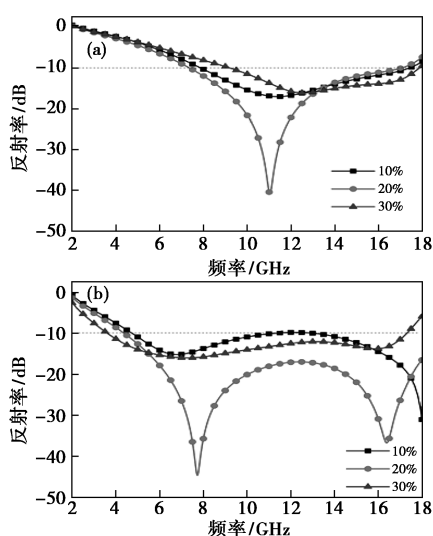


图 3 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料的反射率变化趋势图

[(a)单层蜂窝芯;(b)双层蜂窝芯]

3 结论

(1)采用浸渍法制备了轻质 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料,使导电炭黑与蜂窝夹层材料复合,极大地拓宽了材料的吸波通道,对于有效损耗电磁波十分有利。

(2)在轻质 CB/PUR 蜂窝夹层复合材料中,随着增重的增加,其吸波频带左移,但吸波效果随之减弱。双层结构设计比单层结构更有利于提高复合吸波材料的吸波性能。

(3)在增重量为 10% 和 30% 时,复合材料未表现出优异的吸波能力,而在增重量为 20%、双层结构时,复合材料涂层表现出十分优异的吸波性能。

(4)当增重量为 20%、双层结构时,涂层表现出最佳的吸波性能,最大吸波强度为 -45.6 dB,有效吸波频宽在 4.5~18 GHz 之间,显示出优异的宽频吸波性能。

参考文献

- [1] Choi W H, Kim C G. Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 83: 14-20.
- [2] Wang M L, Liu J Q, Liu X, et al. Research on influence of special-shaped honeycomb radar absorbing structure for wide-band absorbing design[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(20): 6723-6728.
- [3] 华宝家, 杨建生, 聂嘉阳, 赵云峰. 单层和多层蜂窝结构吸波材料[J]. 宇航材料工艺, 1989(21): 65-70.
- [4] 邢丽英, 刘俊能. 蜂窝夹层结构吸波材料浸渍胶液体系的研究[J]. 航空材料学报, 1993(2): 44-51.
- [5] Zhou Q, Yin X W, Ye F et al. A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption[J]. Materials & Design, 2017, 123: 46-53.
- [6] Al Antali A, Umer R, Zhou J, et al. The energy-absorbing properties of composite tube-reinforced aluminum honeycomb[J]. Composite Structures, 2017, 176: 630-639.
- [7] 高正平, 董恩昌, 华宝家, 等. 电路模拟多层雷达吸波材料的设计[J]. 宇航材料工艺, 1996(3): 20-23.
- [8] Kwak B S, Choi W H, Noh Y H, et al. Nickel-coated glass/epoxy honeycomb sandwich composite for broadband RCS reduction[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 191: 107952.
- [9] Wang H, Xiu X, Wang Y, et al. Paper-based composites as a dual-functional material for ultralight broadband radar absorbing honeycombs[J]. Composites Part B Engineering, 2020, 202: 108378.
- [10] Meng Y, Lin Y L, Zhang Y W, et al. Study on the dynamic response of combined honeycomb structure under blast loading[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107082.
- [11] 孟新强. 国外雷达隐身和红外隐身技术的发展动向与分析(续)[J]. 飞航导弹, 2005(7): 34-42.
- [12] 郝巍, 马科峰, 罗玉清, 等. 芳纶纸蜂窝及其夹层结构的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(6): 81-85.
- [13] Wu L J, Wang Q, Tang Z H. Absorbing properties of three dimensional honeycomb-structured absorbing materials[C]. Shanghai: Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics(CEEM), 2012.
- [14] He Y F, Gong G Z, Cao H, et al. Preparation and microwave absorption properties of metal magnetic micropowder-coated honeycomb sandwich structures[J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16: 1501-1505.
- [15] Khurram A A, Ali N, Rakha S A, et al. Optimization of the carbon coating of honeycomb cores for broadband microwave absorption[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(5): 1061-1066.

(下转第 101 页)