

无反射层泡沫夹层结构设计及吸波性能研究

Design and electromagnetic wave absorbing properties of foam sandwich structure without reflective layer

马向雨,邢孟达,张耀辉,宫元勋,陈冲,赵宏杰
(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)
MA Xiang-yu, XING Meng-da, ZHANG Yao-hui,
GONG Yuan-xun, CHEN Chong, ZHAO Hong-jie
(Research Institute of Aerospace Special Materials
and Processing Technology, Beijing 100074, China)

摘要: 针对无反射层的电磁隐身需求,本工作对透波层/吸波泡沫/透波层的夹层结构的吸波性能进行仿真计算,据此制备不同电磁参数的吸波泡沫,对其进行电磁特性表征,并研究吸波泡沫夹层结构的雷达散射截面(RCS)性能。结果表明:在吸波泡沫介电常数为 2.3~2.7,介电损耗为 0.24~0.26 时,无反射层的夹层结构在宽频范围内具有最优的吸波性能。加入炭黑吸收剂泡沫的介电常数和介电损耗具有明显的变化规律,吸波 PMI 泡沫的电磁特性与仿真计算最优吸波泡沫较接近。炭黑质量分数为 8% 时吸波 PMI 泡沫夹层结构在 2~18 GHz 频率范围内具有最优的隐身性能,与仿真计算结果相对应,其通过低频透波、高频吸波实现电磁波隐身。

关键词: 吸波泡沫;夹层结构;无反射层;介电常数;RCS

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000980

中图分类号: TM25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)02-0094-06

Abstract: For the purpose of electromagnetic requirement without reflective layer, the absorbing properties of sandwich structures were calculated. According to the calculated results, different kinds of absorbing foams were prepared and the electromagnetic properties of foams were characterized. The radar cross section (RCS) of wave absorbing foam sandwich structures was also investigated. The calculated results show that sandwich structure has the optimized broadband absorbing property, when dielectric constant is 2.3-2.7 and dielectric loss is 0.24-0.26. There is obvious change law for the dielectric constant of foam with carbon black absorber. The electromagnetic property of PMI foam is close to that of the optimized absorbing foam through calculation. The sandwich structure of wave absorbing PMI foam with 8% (mass fraction) carbon black absorber has the optimized broadband stealth performance, which is corresponding to the calculated result. The sandwich structure can achieve electromagnetic wave stealth through wave transmitting in low frequency band and wave absorbing in high frequency band.

Key words: wave absorbing foam; sandwich structure; non-reflective layer; dielectric constant; RCS

在军事上,雷达吸波材料在实现目标隐身上具有重要意义,为此,制备出“薄、轻、宽、强”的吸波材料成为该领域的发展趋势,其按照材料成型工艺和承载能力可分为涂覆型和结构型两种^[1-5]。采用结构型吸波材料可兼具承载和吸波的双重功能,是实现武器装备结构隐身一体化的有效途径^[6-9]。泡沫作为吸波结构

芯材,具有可设计性强、轻质、耐环境性好等特点,在聚氨酯泡沫(PU)、聚苯乙烯泡沫(PS)、聚甲基丙烯酸酰胺泡沫(PMI)等基体中加入铁氧体、金属微粉、炭黑、石墨、碳纳米管和短切纤维等吸收剂,可获得不同吸波性能的吸波泡沫^[10-13]。经均匀发泡后获得的硬质吸波聚氨酯泡沫,与透波层和反射层复合,获得了轻质宽频

的夹层结构吸波材料^[14-16]。为避免聚氨酯泡沫角锥吸收体大尺寸浸渍和烘干困难,已开发出以聚苯乙烯硬泡沫为外壳,聚苯乙烯泡沫小球和吸波材料混合为填充物的新型角锥吸波材料^[17]。马科峰等研究了掺入炭黑和碳纳米管的吸波 PMI 泡沫,反射率能达到 -15.23 dB,但是 5%(质量分数,下同)炭黑或碳纳米管吸收剂的引入均会降低 PMI 泡沫本体压缩性能约 50%以上^[18-19]。

一般结构型吸波材料均存在反射底层,对于该结构的吸波能力的表征,是利用弓形架法测试平板反射率。而某些环境下的隐身构件并无反射底层^[20-21],利用雷达散射截面(RCS)评价其隐身性能,需对电磁波进行吸收或透过,即要求吸波结构具有“电磁透明”能力。本工作对无反射层的吸波泡沫夹层结构进行仿真设计,为了获得较低的 RCS,吸波泡沫需满足低频透波、高频吸波的特性;根据仿真结果设计制备了 6 种不同电磁参数的吸波泡沫,与透波层结合,制备成泡沫夹层结构,并对其在无反射层状态下的吸波性能和机理进行研究。

1 实验材料与方法

1.1 吸波泡沫夹层结构仿真设计

针对无反射层下宽频隐身需求,本工作设计了透波层/吸波泡沫/透波层的吸波结构。利用 CST 仿真软件计算该结构下无反射底层状态下的反射率,透波层为 1 mm 厚石英纤维布,其介电常数约为 3.5,介电损耗忽略。夹层结构设定了 6 种不同介电常数和介电损耗的吸波泡沫,如表 1 所示。泡沫的介电常数实部范围(ϵ')从 1.1 到 4.2,介电损耗($\tan\delta$)从 0.003 到 0.6,既有低介电常数低损耗的泡沫,又有高介电常数高损耗的泡沫。仿真计算得到的夹层结构的反射率如图 1 所示。从图 1 中可以看出,在低频段(2~8 GHz),1#样品的反射率最低,其泡沫的介电常数和损耗均最低。随着泡沫介电常数的增加,反射率升高,吸波性能变差。低频段的吸波性能主要与介电常数实部相关, ϵ' 越低,吸波性能越好。在高频(8~18 GHz)段,1#样品的吸波性能最差,纯粹依靠透波不能实现宽频范围较好的隐身性能。其他具有介电损耗的泡沫,反射率并无明显规律,损耗最高的 4#也并未获得较好的吸波性能。高频段,需要泡沫的 ϵ' 与透波蒙皮阻抗匹配,且具有一定的电磁波吸收能力。全波段来看,3#样品的吸波性能最优,其 ϵ' 为 2.3~2.7, $\tan\delta$ 为 0.24~0.26 时,整体上表现为低频透波,高频吸波。后续制备吸波泡沫,需要尽可能接近该样品的介电常数和损耗。

表 1 吸波泡沫编号和电磁参数

Table 1 Sample numbers and electromagnetic parameters of wave absorbing foam

| Sample | ϵ' | $\tan\delta$ |
|--------|-------------|--------------|
| 1# | 1.07-1.10 | 0.003-0.004 |
| 2# | 1.50-1.60 | 0.25-0.30 |
| 3# | 2.30-2.70 | 0.24-0.26 |
| 4# | 2.90-3.50 | 0.31-0.34 |
| 5# | 3.20-4.20 | 0.51-0.60 |
| 6# | 2.30-2.40 | 0.05-0.12 |

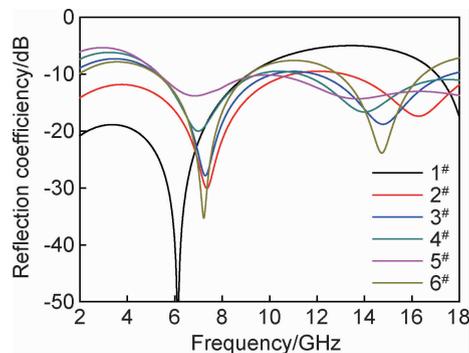


图 1 无反射层不同泡沫夹层结构的反射率仿真计算结果对比
Fig. 1 Calculated reflection coefficient of different foam sandwich structure with no reflective layer

1.2 实验材料

本工作制备和选取了 6 种不同种类和电磁参数的吸波泡沫,如表 2 所示。吸波聚氨酯泡沫的制备过程为:称取一定比例的发泡用原料异氰酸酯(PAPI)、303 聚醚、硅油、三乙醇胺和水(质量比为 100:65:1.5:1.3:1),加入质量分数为 6%的炭黑,混合均匀后,注入到预热的模具中,加压升温至 130 °C,保温 3 h 后得到吸波聚氨酯泡沫(编号 PU-6),密度约为 200 kg/m³。环氧泡沫的制备过程为称取一定比例的环氧树脂(包括固化剂和发泡剂)、异氰酸酯(PAPI)(质量比为 1:3),分别加入质量分数为 0.6%,1%,1.6%的短切碳纤维,室温自然发泡 2~3 min 后,加热至 70 °C 保温 2 h,最后升温至 130 °C 保温 2 h 固化,得到 3 种不同吸收剂含量的吸波环氧泡沫(记为 EP-0.6,EP-1.0 和 EP-1.6),密度为 180~200 kg/m³。吸波 PMI 泡沫为湖南兆恒材料科技有限公司制备,是由可发性的预聚板颗粒、吸收剂和胶黏剂混合后发泡得到,其中加入的吸收剂为炭黑,质量分数分别为 6%和 8%,得到的吸波 PMI 泡沫(记为 PMI-6 和 PMI-8),密度约为 270~280 kg/m³。

1.3 实验方法

采用传输反射法测量上述 6 种吸波泡沫的电磁参数,该法具有简单、精度高等特点,其测试原理是通过网络分析仪直接测量材料的散射参量,通过散射方程

表2 不同种类吸波泡沫的状态

Table 2 Conditions of different types of wave absorbing foams

| Type of foams | Sample | Mass fraction/% | Absorber | Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|---------------|--------|-----------------|--------------------|---|
| PU foam | PU-6 | 6 | Carbon black | 200 |
| EP foam | EP-0.6 | 0.6 | Short carbon fiber | 180-200 |
| | EP-1.0 | 1.0 | | |
| | EP-1.6 | 1.6 | | |
| PMI foam | PMI-6 | 6 | Carbon black | 270-280 |
| | PMI-8 | 8 | | |

反演出材料的电磁参量^[15]。样品测试夹具为矩形波导,将测试样品置于波导中。每种泡沫的电磁参数分3个频段进行测试,频段分别为2.6~3.95 GHz,3.95~5.85 GHz和5.85~8.2 GHz,3个频段对应的测试样品尺寸分别为72.14 mm×34.04 mm×5.00 mm,47.55 mm×22.15 mm×4.00 mm和34.85 mm×15.80 mm×3.00 mm。

制备吸波泡沫夹层结构,选取石英纤维布作为透波层。铺层顺序为10层石英纤维布/环氧树脂预浸料(单层厚度0.1 mm)+吸波泡沫(厚度10 mm)+10层石英纤维布/环氧树脂预浸料,130℃模压固化2 h后

得到6种不同的吸波泡沫夹层结构,具有透波层/吸波泡沫/透波层结构。吸波夹层结构厚度约为12 mm,尺寸为180 mm×180 mm。在微波暗室中测试不同泡沫夹层结构相对于标准金属板的RCS缩减值,并进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 吸波泡沫微观组织

对制备的吸波聚氨酯泡沫(PU-6)、吸波环氧泡沫(EP-1.0)和吸波PMI泡沫(PMI-6)的微观组织进行观察,如图2所示。从图2(a)中可以看出,吸波聚氨酯泡沫发泡质量较好,颗粒状的炭黑吸收剂存在于聚氨酯泡沫的泡孔壁上,并形成了微小的孔洞。短切碳纤维在吸波环氧泡沫中分布较均匀,如图2(b)所示,但短切碳纤维的引入,对吸波环氧泡沫的质量产生了不利影响,形成了一些较大的孔洞缺陷。PMI泡沫的泡孔比较完整,未在泡沫内和孔壁上观察到吸收剂,如图2(c)所示。吸波PMI泡沫是发泡后的泡沫颗粒,通过掺混吸收剂的胶黏剂粘接而成,相对于PU和EP泡沫,PMI泡沫的密度更大,其泡孔尺寸较小。

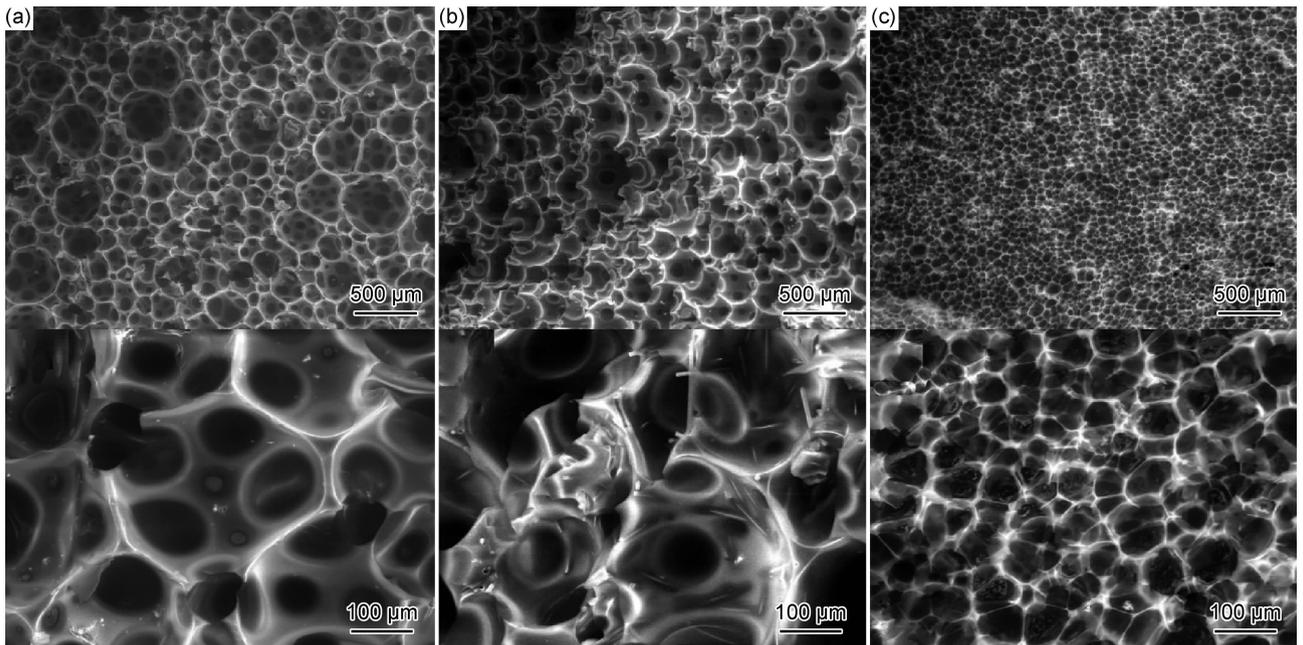


图2 吸波泡沫微观形貌 (a)PU-6;(b)EP-1.0;(c)PMI-6

Fig. 2 Microstructures of wave absorbing foam (a)PU-6;(b)EP-1.0;(c)PMI-6

2.2 吸波泡沫电磁特性表征

对制备的6种不同的吸波泡沫进行电磁参数测试。图3为5.85~8.2 GHz频段下,不同泡沫 ϵ' 和 $\tan\delta$ 对比。从图3中可以看出,吸波泡沫的 ϵ' 随频率变化不大, $\tan\delta$ 的变化规律各不相同。吸波聚氨酯泡沫的 ϵ' 为

2.1~2.2, $\tan\delta$ 为0.06~0.14, $\tan\delta$ 随频率逐渐升高。吸波环氧泡沫EP-0.6,EP-1.0和EP-1.6的 ϵ' 分别为2.5~2.4,4.5~4.2和5.4~5.3, $\tan\delta$ 分别为0.08~0.10,0.15~0.31和0.15~0.26。随着吸收剂含量升高,吸波环氧泡沫的 ϵ' 增大。吸收剂含量为1.0%时,

$\tan\delta$ 在 7.5 GHz 时达到最大值; $\tan\delta$ 整体随着频率升高呈上升趋势。吸波 PMI 泡沫 PMI-6 和 PMI-8 的 ϵ' 分别

为 2.0~1.9 和 2.4~2.3, $\tan\delta$ 为 0.24~0.22 和 0.29~0.27, ϵ' 和 $\tan\delta$ 均随频率升高而降低。

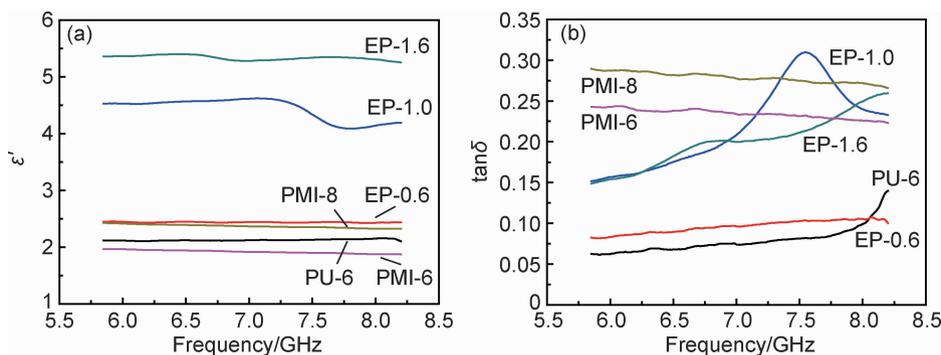


图 3 不同吸波泡沫的电磁参数对比(5.85~8.2 GHz) (a) ϵ' ; (b) $\tan\delta$

Fig. 3 Electromagnetic parameters of different wave absorbing foams (5.85~8.2 GHz) (a) ϵ' ; (b) $\tan\delta$

同时还对吸波环氧泡沫 EP-1.6、吸波 PMI 泡沫 PMI-6 和 PMI-8 3 种泡沫在 2.65~8.2 GHz 频率范围内的电磁参数进行对比研究,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在较宽的频率范围内,吸波 PMI 泡沫的介电常数实部和损耗均随频率的升高逐渐降低,且变化幅度较小;而吸波环氧泡沫则无明显规律,且具有较

大波动。这可能是由于加入吸收剂的种类不同引起的,PMI 泡沫中加入的是炭黑,而环氧泡沫中掺入的是短切纤维。总体来说,加入炭黑吸收剂的吸波泡沫的电磁特性具有明显的变化规律。而吸波 PMI 泡沫 PMI-8 的电磁参数最接近 RCS 仿真计算结果最佳的泡沫参数(3# 样品)。

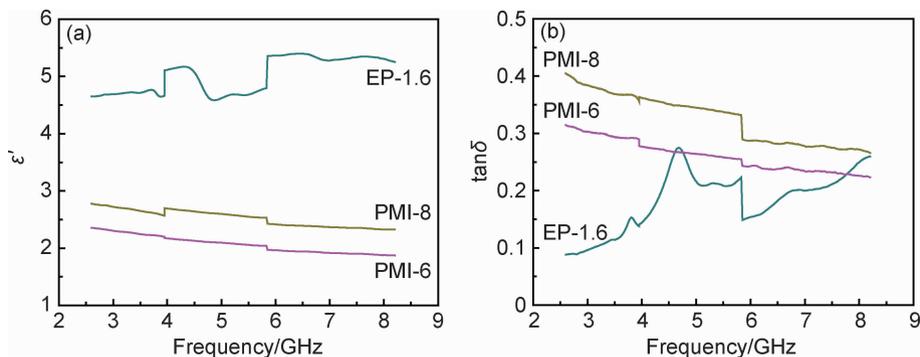


图 4 不同泡沫的电磁参数对比(2.65~8.2 GHz) (a) ϵ' ; (b) $\tan\delta$

Fig. 4 Electromagnetic parameters of different wave absorbing foams (2.65~8.2 GHz) (a) ϵ' ; (b) $\tan\delta$

2.3 吸波泡沫夹层结构 RCS 对比

对不同的吸波泡沫夹层结构进行 RCS 性能测试,结果如图 5 所示。对比 6 种泡沫的 RCS 性能可以看出,吸波聚氨酯泡沫 PU-6 夹层结构在低频段(2~8 GHz)具有较好的 RCS 性能,而在高频段(8~18 GHz)的隐身性能较差,其介电常数和损耗均处于较低的水平,电磁波在低频透过性好,而高频不易透过,吸收较少,导致隐身性能不好。吸波环氧泡沫 EP-0.6 和 EP-1.0 夹层结构的 RCS 性能均较差,而 EP-1.6 夹层结构的 RCS 性能两个极化间存在较大差异。吸波 PMI 泡沫夹层结构在低频段 RCS 性能略差,高频段较优异,且两个极化之间 RCS 性能差异很小。综合考虑全频段(2~18 GHz)和两个极化的 RCS 性能,

吸收剂含量为 8% 的吸波 PMI 泡沫夹层结构具有最佳的隐身性能,其吸波泡沫的电磁参数与仿真计算的最优结果相对应。无反射层的吸波泡沫夹层结构的隐身机理为低频透波,高频吸波;吸波泡沫的介电常数与透波层阻抗匹配,且还需兼具一定的电磁损耗能力。通过仿真计算优化吸波泡沫,并制备多种吸波泡沫进行验证,为以后该类夹层结构全波段隐身的实现提供一种设计思路。

3 结论

(1) 仿真计算吸波泡沫 ϵ' 为 2.3~2.7, $\tan\delta$ 为 0.24~0.26 时,无反射层的夹层结构在宽频范围内具

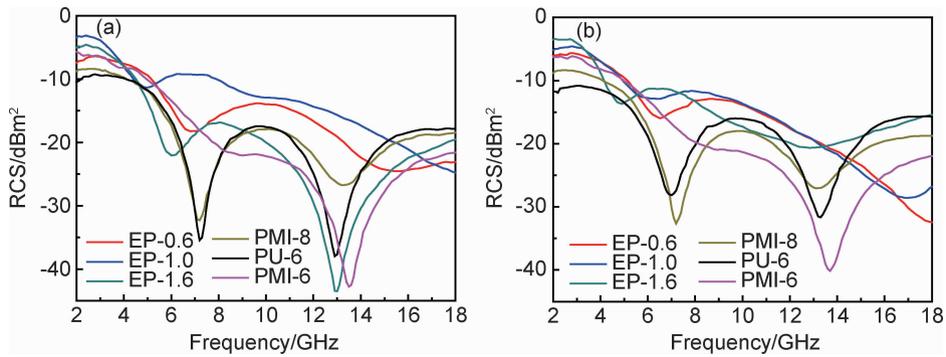


图5 不同吸波泡沫夹层结构的 RCS 对比 (a)水平极化;(b)垂直极化

Fig. 5 RCS of different electromagnetic wave absorbing foam sandwich structure (a)horizontal polarization;(b)vertical polarization

有最优的吸波性能。

(2)分别加入质量分数6%和8%吸收剂炭黑的吸波 PMI 泡沫的 ϵ' 分别为 2.0~1.9 和 2.4~2.3, $\tan\delta$ 为 0.24~0.22 和 0.29~0.27, 与仿真计算最优吸波泡沫的电磁特性较接近。

(3)吸收剂含量为8%的吸波 PMI 泡沫夹层结构在 2~18 GHz 频率范围内具有最优的隐身性能,其吸波泡沫的电磁特性与仿真计算的最优结果相对应,介电常数与透波层阻抗匹配,兼具一定的电磁损耗能力。无反射层的吸波泡沫夹层结构通过低频透波,高频吸波实现电磁波隐身。

参考文献

[1] 李金儒,陈康华,范令强,等. 雷达吸波材料的研究进展[J]. 功能材料, 2005, 36(8): 1151-1154.
LI J L, CHEN K H, FAN L Q, et al. Current status and development in radar absorbing materials [J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(8): 1151-1154.

[2] CURTIS P T. Multifunctional polymer composites [J]. Advanced Performance Materials, 1996, 3(3): 279-293.

[3] PAWAR S P, BISWAS S, KAR G P. High frequency millimetre wave absorbers derived from polymeric nanocomposites [J]. Polymer, 2016, 84: 398-419.

[4] 高海涛,王建江,李泽. 基于超材料设计的钡铁氧体吸波涂层研究[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 70-76.
GAO H T, WANG J J, LI Z. Barium ferrite microwave absorbing coating based on metamaterial design[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 70-76.

[5] 刘政,何山,黄大庆. 吸收剂复合改性对材料电磁性能的影响[J]. 航空材料学报, 2018, 38(6): 77-82.
LIU Z, HE S, HUANG D Q. Influence of composite absorbent modification on electromagnetic properties[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(6): 77-82.

[6] 鹿海军,刘晓丽,刘义,等. 结构吸波泡沫及其夹层结构隐身材料的研究现状[J]. 材料工程, 2011(增刊1): 9-14.
LU H J, LIU X L, LIU Y, et al. Development and progress in structural foam absorber and foamed stealth sandwich composites

[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(Suppl 1): 9-14.

[7] 胡爱军,王志媛,金净,等. 泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势[J]. 宇航材料与工艺, 2009(1): 1-4.
HU A J, WANG Z Y, JIN Z, et al. Advances in foam core sandwich structure composites with absorbing stealth materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2009(1): 1-4.

[8] 礼嵩明,蒋诗才,望咏林,等. “超材料”结构吸波复合材料技术研究[J]. 材料工程, 2017, 45(11): 10-14.
LI S M, JIANG S C, WANG Y L, et al. Study on “metamaterial” structural absorbing composite technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(11): 10-14.

[9] 周远良,赛义德,张黎,等. 树脂基 Fe 纳米粒子及碳纤维复合吸波平板的制备与性能[J]. 材料工程, 2018, 46(3): 41-47.
ZHOU Y L, SAI Y D, ZHANG L, et al. Preparation and performance of resin-based Fe nanoparticles/carbon fibers microwave absorbing composite plates[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3): 41-47.

[10] YUAN H, XIONG Y L, SHEN Q, et al. Synthesis and electromagnetic absorbing performances of CNTs/PMMA laminated nanocomposite foams in X-band [J]. Composites, Part A, 2018, 107: 334-341.

[11] LAUR V, BENZERGA R, LEBULLENGER R, et al. Green foams for microwave absorbing applications: synthesis and characterization [J]. Materials Research Bulletin, 2017, 96: 100-106.

[12] DONG S, HU P, ZHANG X H, et al. Carbon foams modified with *in-situ* formation of Si_3N_4 and SiC for enhanced electromagnetic microwave absorption property and thermostability [J]. Ceramics International, 2018, 44(6): 7141-7150.

[13] MEJEAN C, POMETCU L, BENZERGA R, et al. Electromagnetic absorber composite made of carbon fibers loaded epoxy foam for anechoic chamber application [J]. Materials Science and Engineering: B, 2017, 220: 59-65.

[14] 李娟,邓京兰,王继辉. 聚氨酯泡沫夹层复合材料的制备及其吸波性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2010, 35(2): 19-22.
LI J, DENG J L, WANG J H. Preparation and wave absorbing characteristics of polyurethane foam core sandwich composites [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2010, 35(2): 19-22.

[15] 贾莉莉,毕红,王亚芬. 聚氨酯泡沫复合材料的制备及其吸波性能研究[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 66-68.

- JIA L L, BI H, WANG Y F. Preparation and study of polyurethane composite foam and its microwave absorption properties [J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2007, 31(5): 66-68.
- [16] 黄小忠,黎炎图,杜作娟,等. 磁性吸波碳纤维掺杂聚氨酯泡沫制备夹层结构吸波材料[J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(4): 32-36.
- HUANG X Z, LI Y T, DU Z J, et al. Sandwich structure absorbing material is prepared with magnetic coating carbon fiber doping polyurethane froth [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009, 34(4): 32-36.
- [17] 王相元,朱航飞,钱鉴,等. 外壳为聚苯乙烯硬泡沫的角锥吸波材料[J]. 电波科学学报, 2001, 16(1): 41-44.
- WANG X Y, ZHU H F, QIAN J, et al. Pyramidal absorbers made of hard foam polystyrene shell [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(1): 41-44.
- [18] 马科峰,张广成,刘良威,等. 吸波性 PMI 泡沫塑料的制备及性能研究[J]. 应用化工, 2011, 40(1): 38-44.
- MA K F, ZHANG G C, LIU L W, et al. Preparation and properties of absorbing PMI foam [J]. Applied Chemical Industry, 2011, 40(1): 38-44.
- [19] 燕子,张广成,马科峰,等. 碳纳米管填充 PMI 泡沫的制备及其吸波性能研究[J]. 应用化工, 2012, 41(5): 844-847.
- YAN Z, ZHANG G C, MA K F, et al. Preparation and wave-absorbing performance of carbon nanotubes filled PMI foam [J]. Applied Chemical Industry, 2012, 41(5): 844-847.
- [20] 吴明忠,赵振声,何华辉. 无导电衬底单轴吸波材料的反射和透射特性[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(11): 32-34.
- WU M Z, ZHAO Z S, HE H H. Reflection and transmission characteristics of uniaxial anisotropic radar absorbing materials without conduction bases [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 26(11): 32-34.
- [21] 张军英,张雨,姜维维. 微波材料的电磁参数测试方法[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(5): 107-110.
- ZHANG J Y, ZHANG Y, JIANG W W. Testing methods of microwave material's electromagnetic parameters [J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(5): 107-110.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51503192)

收稿日期:2018-08-14;修订日期:2019-10-11

通讯作者:马向雨(1988—),男,工程师,博士,研究方向为结构吸波材料,联系地址:北京市 7203 信箱 20 分箱(100074),E-mail: hagongdamxy@126.com

(本文责编:解 宏)