

泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势

胡爱军 王志媛 金 诤 王金良 杨士勇

(中国科学院化学研究所,北京 100190)

文摘 介绍了吸波隐身材料的发展趋势、泡沫型吸波材料的优势及新型聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫的优异性能,展望了以 PMI 泡沫为芯材制备泡沫隐身复合材料的应用前景。

关键词 PMI 泡沫,泡沫夹芯,复合材料,吸波材料

Advances in Foam Core Sandwich Structure Composites With Absorbing Stealth Materials

Hu Aijun Wang Zhiyuan Jin Zheng Wang Jinliang Yang Shiyong

(Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Progress of radar absorbing stealth material, the advantage of foam core sandwich structure composite and excellent properties of Polymethacrylimide (PMI) foams are described. PMI foams used as radar absorbing material in the field of aviation and aerospace industries due to their high thermal stability and heat shape retention are introduced.

Key words PMI foam, Foam core, Composite, Radar absorbing material

1 引言

在军用雷达技术不断发展的同时,反雷达侦破的雷达吸波材料(RAM)获得了空前发展。雷达吸波材料能够吸收投射到它表面的电磁波能量,并通过材料的损耗转变为热能。泡沫夹芯型吸波材料不但在较宽频带内对电磁波具有高的吸收率,同时还具有质量轻、耐高温、耐湿热、抗腐蚀等特点。美国自 20 世纪 60 年代始就将雷达吸波材料应用于许多军用战机型号上,包括 F-14、F-15 和 F-18 等,形成了军用飞机的“隐形”技术,且其水平不断提高。海湾战争中,F-117 隐形飞机的表现令世人震惊,飞机隐身即刻成为世界各国关注的热点。

雷达吸波材料按照损耗机理,可分为介电型吸波材料和磁介质型吸波材料,主要包括铁氧体、金属微粉、钛酸钡、碳化硅、石墨、导电纤维、纳米材料、多晶纤维、手性材料、导电高聚物及电路模拟吸波材料等。按照成型工艺,分为涂覆型和结构型,其中涂覆

型吸波材料是具有电磁波吸收功能的涂料,其工艺简单,使用方便,因容易调节而受到重视^[1];而结构型吸波材料则具有承载和吸波的双重功能,结构型吸波材料的复合形式包括叠层型吸波材料、夹层型吸波材料等^[2]。按照吸收原理,可分为吸收型和干涉型两类,其中吸收型吸波材料主要是材料本身对雷达波的损耗吸收,而干涉型材料则利用吸波层表面反射和底层反射波的振幅相等、相位相反进行干涉抵消等。

近年来,国内外学者在研究并改进传统的吸波材料的同时,对新型吸波材料也进行了大胆的探索^[3],发展了许多新型材料,包括纳米吸波材料、宽频谱吸波材料、手性吸波材料、导电高分子吸波涂料、多晶纤维吸波涂料、电路模拟吸波材料、等离子体吸波材料、结构吸波材料等。但是,雷达吸波材料目前还存在频带窄、效率低、密度大等缺点,应用范围受到一定限制。发展兼容型吸波材料,即能兼容米波、厘米波、毫米波及红外激光等多波段的吸波材料,拓宽吸波波

收稿日期:2008-09-20

作者简介:胡爱军,1966 年出生,高级工程师,主要从事耐高温基体树脂及复合材料的制备与研究。E-mail: aijunhu@iccas.ac.cn

段,是今后研究的主要方向之一。既能承载又能吸波,同时具有宽频带、高效率的结构型吸波材料也成为研究与发展的重点^[4]。本文简要概述了泡沫夹芯型吸波材料在宽频、高效吸波材料中的应用情况,以及新型 PMI(聚甲基丙烯酸酰胺)泡沫及其夹芯结构在隐身复合材料中的应用前景。

2 泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料

雷达吸波结构材料包括层板型、蜂窝夹芯型、泡沫夹芯型等多种形式,其中泡沫夹芯型材料具有特殊而重要的地位。泡沫夹芯型材料的制备方法通常是以热塑性或热固性树脂(如环氧树脂、双马树脂等)树脂与吸收剂混合形成树脂基体,涂覆在纤维(包括碳纤维、玻璃或石英纤维、芳纶纤维等)表面形成预浸料,然后与泡沫夹芯通过共固化形成复合隐身材料。另一种制备方法是将具有吸波性能的泡沫夹芯与碳(或玻璃)/树脂预浸料共固化形成泡沫夹芯型复合隐身材料。这类材料不仅对雷达波、红外线有很高的吸收率,而且具有强度高、韧性好、质量轻等特点,可使武器系统明显减重、增强机动性能。如 B-2 飞机的蒙皮就采用了这类材料^[5]。

近年来,有关泡沫夹芯型结构隐身材料的报道很多。张义桃等将微米级钡铁氧体和炭黑或其混合物为吸波剂分散于聚氨酯泡沫中形成夹芯材料,发现在聚氨酯软质泡沫中添加 15% (质量百分数,下同)碳粉和 5% 钡铁氧体可以得到吸波性能泡沫芯材,其反射系数可达 -7dB ^[6]。吕述平等将氧化锰和炭黑作为吸收剂填充到聚苯乙烯泡沫中,材料在高频(8.2 ~ 12.4 GHz)、低频(2.4 ~ 3.85 GHz)范围内的吸收都超过 40 dB^[7]。美国专利(US 6043769)公开了一种由泡沫颗粒与纤维束形成的结构吸波材料^[8],将纤维束分布在泡沫颗粒上形成一种泡沫纤维混合物,然后将其加工铸成所需形状,能够在 10 MHz ~ 100 GHz 吸收电磁波。美国专利(US 6231794)公开了一种可以改善吸波性能的泡沫吸波材料的制备方法^[9],将导电材料分散于网状结构的泡沫中,然后采用真空工艺与其他结构形状的泡沫板复合,得到一种质量轻、吸波频带宽的泡沫吸波材料。目前,泡沫夹芯型吸波结构材料已在多种先进军用战机中获得应用,包括美国 F-117A、B-2、F-22 等战机型号^[10]。

3 聚甲基丙烯酸酰胺泡沫 (PMI) 及其夹芯结构在隐身复合材料中的应用前景

PMI 是一种交联型硬质结构型泡沫材料,具有 100% 的闭孔结构,交联均匀的孔壁结构赋予其突出的结构稳定性和优异的力学性能;聚合物主链化学结构中的环状酰胺基团确保了材料的耐高温性能。另一个独特的性能是其发泡工艺,PMI 泡沫是由其前

驱体在热作用下通过化学转化反应形成 PMI 的过程中自然形成泡沫结构的,整个发泡过程中不使用含氯、氟烷烃和卤素。因此,PMI 泡沫具有许多其他聚合物泡沫,如聚氨酯泡沫、聚苯乙烯泡沫、PVC 泡沫等无法比拟的优点。其优点主要包括^[11]:(1)100% 的闭孔结构,且各向同性;(2)耐热性能好,热变形温度为 180 ~ 240℃;(3)比强度高;(4)在加工过程中具有很好的抗压缩蠕变性能;(5)热成型;(6)不含氟里昂和卤素;(7)良好的防火性能,燃烧无毒,低烟雾密度,不释放有害物质;(8)和各种树脂体系的兼容性好(湿法和预浸料);(9)易于机械加工,不需要特殊的机械工具。

图 1 和图 2 比较了 PMI 泡沫与其他聚合物泡沫的热变形温度和力学性能。可以看出,在相同密度条件下,PMI 泡沫具有最高的温度、强度和耐压缩性能。

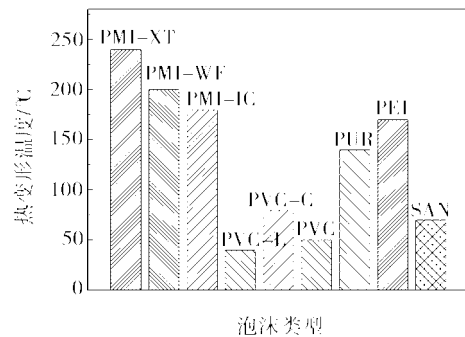


图 1 商品化泡沫热变形温度的比较

Fig. 1 Heat distortion temperatures of commercial foams

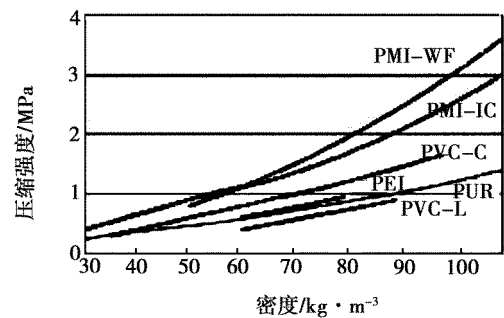


图 2 商品化泡沫压缩强度的比较

Fig. 2 Compressive strengths of commercial foams

优异的耐高温性能、高温下优异的耐蠕变性(表 1),使 PMI 泡沫能够承受树脂基复合材料的高温固化工艺,实现泡沫夹芯与预浸料一次性共固化;另外,优异的耐疲劳性能(表 2)使 PMI 泡沫适用于机车、高速船、航空和风力发电叶片等结构^[12]。PMI 泡沫经适当的高温处理后,能够承受高温固化过程,满足复合材料泡沫夹芯结构成型工艺对泡沫夹芯尺寸稳定性的特殊要求^[13]。

表 1 不同泡沫的蠕变特性

Tab.1 Creep properties of commercial foams

泡沫类型	蠕变/%	
	125℃,0.3 MPa,2 h	180℃,0.7 MPa,2 h
PU 聚氨酯	>12 或材料压溃	不能适用
PVC HT(高温型)	10	不能适用
PMI WF	1.5	-
PMI WF - HT ¹⁾	-	3.5
PMI WF - HT ²⁾	-	1.5

注:1)HT 表示经过热处理以后的材料:130℃/2 h;190℃/48 h;2)密度 110 kg/m³。

表 2 不同泡沫芯材的疲劳性能比较

Tab.2 Fatigue properties of foam cores

泡沫芯材	τ/τ_{crit}^{-1})	f/Hz
PMI51S	0.58	4
PMI71WF	0.50	4
PMI71IG	0.52	4
PMI71FX	0.52	4
X - PVC(60 kg/m ³)	0.30	4
X - PVC(80 kg/m ³)	0.33	4
PEI(80 kg/m ³)	0.25	4

注:1) τ/τ_{crit} = 加载 500 万次,芯材不发生破坏的最大承受力。

自 20 世纪 70 年代以来,PMI 泡沫已经应用于许

多航天、航空飞行器中,包括麦道公司 MD11 的襟翼导流片、进气道;韦斯特兰直升机公司的“山猫”、“海王”的主、尾旋翼;空客公司 A320 扰流器、A340/500/600 气密机身;欧洲直升机公司 EC135、NH90 的主、尾旋翼;波音公司与西科斯基公司联合研制的 RAH -66 “科曼奇”的旋翼等。

自 2005 年起,中国科学院化学研究所率先在国内开展了 PMI 泡沫材料的生产技术研究,目前已取得了突破性进展。所制备的泡沫暂命名为 KHPM -1 型泡沫,其密度范围在 40 ~ 220 kg/m³,最大尺寸可达 1 200 mm × 1 000 mm × 30 mm。图 3 为 KHPM 泡沫的微观结构。表 3 为密度为 75 和 110 kg/m³ 两种 KHPM -1 型泡沫的典型性能。

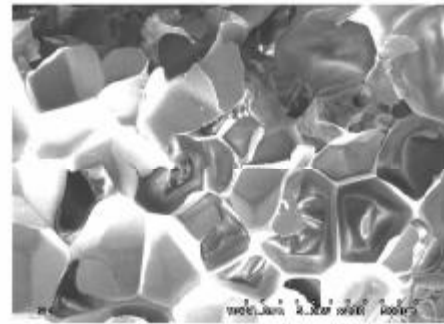


图 3 KHPM - I 泡沫的微观结构

Fig.3 Microstructure of KHPM -1 foam

表 3 KHPM -1 泡沫材料的典型性能

Tab.3 Typical properties of KHPM -1 foams

泡沫材料	密度/kg·m ⁻³	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa	断裂伸长率/%	压缩强度/MPa	弯曲强度/MPa	热变形温度/℃
KHPM -I - 75	75 ± 5	1.8 ~ 2.4	88 ~ 108	3.0	1.7	2.7 ~ 3.0	200
KHPM -I - 110	110 ± 15	2.9 ~ 3.8	150 ~ 188	3.0 ~ 3.5	2.7 ~ 3.8	4.0 ~ 5.0	200

将具有吸波性能的导电粒子分散于 PMI 泡沫中,不但可赋予材料优良的吸波性能,同时不会明显

损伤材料的力学性能(表 4),因此是一类应用前景广阔的吸波性泡沫夹芯材料。

表 4 隐身型 PMI 泡沫板的性能^[14]

Tab.4 Mechanical properties of PMI foams

PMI 泡沫板	密度/kg·m ⁻³	压缩强度/MPa	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa	剪切强度/MPa	剪切模量/MPa	热变形温度/℃
71EC -5	75	1.6	2.1	103.4	1	27.6	200
110EC -5	110	2.7	-	-	2	-	200
71WF	75	1.7	2.2	105	1.3	42	200
110WF	110	3.6	3.7	180	2.4	70	200

4 结语

我国在雷达吸波材料的研究和发展方面与国外相比还有较大的差距,密切关注国外在隐身领域的最

新研究动态,加大对雷达吸波材料的研究力度对于提高我国的国防实力,具有十分重要的意义。

随着武器型号对雷达吸波材料的耐热等级、力学

性能、吸波性能、波频宽度要求的不断提高,目前普通聚合物泡沫材料已无法满足应用需求,发展具有更高耐热等级、更高力学性能、同时可与多种吸波剂复合的泡沫材料成为新的研究热点。新型的 PMI 泡沫具有高强、耐高温、优异的抗疲劳性能和蠕变性能、良好的树脂兼容性等特点,在泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料朝着轻量化、宽频率、高效率、兼容型发展中必将起到重要的作用。

参考文献

- 1 Zheng Yanfei, Kikuchi, Kazuo. Two-layer wideband antireflection coatings with an absorbing layer. *Applied Optics*, 1997;36(25):6 335 ~6 338
- 2 Curtls P T. Multifunctional polymer composites. *Advanced Performance Materials*, 1996;3(3):279 ~293
- 3 于仁光,乔小晶,张同来等. 新型雷达波吸收材料研究进展. *兵器材料科学与工程*, 2004;27(2):63 ~66
- 4 赵九蓬,李焱,吴佩莲. 新型吸波材料研究动态. *材料科学与工艺*, 2002;10(2):219 ~224
- 5 邢丽英. 隐身材料. 北京: 化学工业出版社, 2004:133
- 6 张义桃,徐俊,朱刚等. 钡铁氧体、炭黑填充聚氨酯软质

泡沫基吸波材料性能的研究. *功能材料*, 2007;38(增刊):3 005 ~3 007

7 吕述平,刘顺华,赵彦波. 新型填充式吸波材料的研究. *功能材料与器件学报*, 2005;11(4):498 ~500

8 Rowe et al. Radar absorber and method of manufacture. US 6043769, 2000

9 Woldanski G L. Process for making a low density foam filled reticulated absorber by means of vacuum. US 6321794, 2001

10 王伟力. 隐身技术发展动态. *飞航导弹*, 2001;(1):26 ~29

11 胡培. PMI 泡沫: 夹层结构的芯材. *玻璃钢*, 2003;(2):9 ~17

12 胡培. 夹心结构芯材疲劳性能的比较. *玻璃钢*, 2002;(4):30 ~35

13 曹明法,胡培. 船舶玻璃钢/复合材料夹层结构中的泡沫芯材. *江苏船舶*, 2004;(2):3 ~6

14 ROHACELL 技术手册. 2007

(编辑 任涛)

《宇航材料工艺》编辑部 论文著作权转让书

(范本)

论文中文文题:

论文英文文题:

作者(代表)联系电话:

电子邮箱:

全体作者姓名:

遵照《中华人民共和国著作权法》,上述论文全体作者同意将该论文之著作权中的财产权(含各种介质、媒体,以各种语言、各种形式出版的使用权),在全世界范围内转让给《宇航材料工艺》编辑部。本转让书自作者签字之日起生效。

若从《宇航材料工艺》编辑部收到本转让书之日起,作者在90日之内没有收到上述论文的修改意见或录用通知,则本转让书自动失效。

在签署本转让书时作者作如下保证并对其负全部责任:

- (1)上述论文是作者独立创作的原创性作品,未曾在国内外书刊上公开发表过;
- (2)该论文符合国家有关保密的规定(航天系统作者须同时附作者单位的保密审查证明);
- (3)该论文不侵犯任何第三方的著作权及其他合法权利。

同时承诺:

- (1)《宇航材料工艺》没有向作者做出修改、录用或退稿通知之前(在前述限定的时间内),不将上述论文投往其他刊物;
- (2)签字作者保证其本人具有签署本转让书并做出各项承诺之全权;
- (3)有证据能证明未签字之作者授权签字作者代表其签署本转让书;本转让书对全体作者均有约束力。

作者(代表)签字:

年 月 日于 (地点)