

雷达吸波复合材料外观失效机理分析及控制方法研究

张天才¹, 李希¹, 孙宇楠², 蒋和跃³, 龙沛³, 阿旺旦增¹, 王振海¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 哈尔滨 150060; 3.陆军装备部驻重庆地区第六军事代表室, 重庆 400042)

摘要: **目的** 解决多层泡沫夹芯结构的雷达吸波复合材料在环境效应下产生外观失效的问题。**方法** 制备3种类型的雷达吸波复合材料, 开展典型自然环境试验。观察试验样品外观状态, 并检测变形量。通过观察泡沫的微观组织形貌, 检测热膨胀量变化及泡沫与树脂间的粘黏强度, 用气相色谱质谱联用仪 GCMS 检测复合材料裂解气体成分, 分析复合材料外观失效成因, 并提出解决技术途径。**结果** 6个月自然环境试验后, 1#、2#样品外观失效, 而3#样品无明显变化。复合材料 100 °C 裂解气体成分为氮气、二氯一氟乙烷、甲基膦酸二甲酯。4种泡沫在 22~85 °C 的最大热膨胀量分别为-0.18%、-0.37%、-0.30%、-0.45%。环氧树脂与4种泡沫的粘黏强度在 41~52 N, 而聚氨酯树脂达到了 54~81 N。**结论** 雷达吸波复合材料泡孔内残留气体的释放, 是导致外观失效的根本原因。通过热处理工艺, 减少样品残留气体量, 并提升胶黏剂与泡沫的粘黏复合强度, 是提升复合材料环境适应性的有效技术途径。

关键词: 雷达吸波复合材料; 多层泡沫夹芯结构; 热膨胀量变化; 外观失效; 自然环境试验; 环境适应性

中图分类号: TJ04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)07-0175-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.022

Mechanism and Controlling Method for Appearance Failure of Radar Absorbing Composites

ZHANG Tian-cai¹, LI Xi¹, SUN Yu-nan², JIANG He-yue³, LONG Pei³, A Wang-dan-zeng¹, WANG Zhen-hai¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. AVIC Haerbin Aircraft Industry Group, Co., Ltd., Haerbin 150060, China; 3. The Sixth Military Representative Office of the Army Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400042, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the appearance failure of radar absorbing composites with multi-layer foam sandwich structure under environmental effect. Three types of radar absorbing composites were prepared and tested in the typical natural environment. The appearance of the test sample was observed and the deformation was detected. By observing the microstructure morphology of the foam, the change of heat expansion and the adhesive strength between the foam and the resin was detected. A GCMS was used to detect the fracturing gas composition of the composites, and the causes for appearance failure of

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2023-02-04

Received: 2022-10-17; Revised: 2023-02-04

作者简介: 张天才(1979—), 男, 硕士。

Biography: ZHANG Tian-cai (1979-), Male, Master.

引文格式: 张天才, 李希, 孙宇楠, 等. 雷达吸波复合材料外观失效机理分析及控制方法研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 175-181.

ZHANG Tian-cai, LI Xi, SUN Yu-nan, et al. Mechanism and Controlling Method for Appearance Failure of Radar Absorbing Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 175-181.

the composites and the technical solutions were analyzed. After 6 months of natural environment test, the appearance of 1# and 2# samples failed, while that of 3# samples did not change significantly. The composition of the fracturing gas at 100 °C was nitrogen, dichlorofluoroethane and dimethyl methylphosphonate. At 22-85 °C, the maximum heat expansion of the four foams was -0.18%, -0.37%, -0.30% and -0.45%, respectively. The adhesive strength of epoxy resin to four foams was 41-52 N, while that of polyurethane resin was 54-81 N. Residual gas release in the pores of radar absorbing composites is the root cause of appearance failure. It is an effective technical way to improve the environmental adaptability of composites by reducing the amount of residual gas in samples and improving the adhesive strength between adhesives and foams by heat treatment.

KEY WORDS: radar absorbing composites; multi-layer foam sandwich structure; change of heat expansion; appearance failure; natural environmental test; environmental adaptability

雷达吸波复合材料是一种具有宽频强吸收效果的雷达隐身功能材料,可有效降低装备目标特征信号90%以上,实现装备雷达散射截面积 RCS 降低 10 dB 以上的效果^[1-3]。同时,又能作为装备结构件,制成各种形状复杂的部件,起到力学承载作用的同时,减轻结构质量,是隐身功能材料的重要发展方向^[4-6],已大量应用于先进隐身飞机、舰船、导弹及其他隐身武器中。如美国的 F-117 隐身攻击机、B-2 隐身轰炸机和 F/A-22 隐身多用途战斗机均在不同部位大量使用了结构隐身复合材料^[7-9]。

以聚氨酯硬质泡沫为基体制备的雷达吸波复合材料具有良好的吸波性能,在微波吸收方面显示出很强的设计适应性,具有广阔的发展前景^[10-12]。为实现宽频雷达隐身兼容,必须制备成多层泡沫夹芯结构,通过不同吸收层匹配,才能实现吸波频段宽、吸收效果强的目的^[13-15]。何山等^[16]以导电碳黑与聚氨酯泡沫为原料,研制的 XkuP-4 多层泡沫吸波材料,在 8~18 GHz 内,反射率均小于-15 dB。贺龙辉等^[17]制备的聚氨酯泡沫吸波材料,当设计为匹配层与吸收层的双层结构时,即使保持与单层吸收层相同的厚度,其吸波性能也显著提升,在 8~18 GHz 整个频段优于 -10 dB,最大反射率达到了-21.1 dB。

多层泡沫夹芯结构的复合材料,每层泡沫的热性质存在差异,且需要采用层间复合成形工艺。聚氨酯硬质泡沫相比其他泡沫,有力学承载能力上的优势,但其泡孔呈闭孔型,内部气体不流通,具有形变不可逆的特征。因此,在高温、低压等环境效应作用下,复合材料不可避免地出现变形、分层、鼓包等外观失效问题,严重影响了材料的服役质量,限制了隐身功能的发挥,极大地缩短了使用寿命。在实现复合材料宽频强吸收的雷达隐身功能前提下,解决由多层泡沫夹芯结构带来的环境适应性差的问题,是本文的主要研究内容。

1 样品制备

1.1 原材料

试验所用材料有:硬质泡沫(见表1)、环氧树

脂、环氧固化剂、聚氨酯树脂、聚氨酯固化剂、0.5 mm 玻璃钢板、0.2 mm 碳布、军绿色聚氨酯面漆及配套固化剂。

表1 硬质泡沫原材料型号及尺寸
Tab.1 Type and size of rigid foams

名称	型号	厚度/mm
硬质聚氨酯泡沫	C4	8
	C3	6
	C2	5.5
	C1	4.5
硬质聚氯乙烯泡沫	PMN	4.5

1.2 雷达吸波复合材料的制备

首先将环氧树脂与环氧固化剂按照 10:6.5 的质量比配料,并搅拌均匀。设置淋胶机的速度为 43 m/min,出胶点间距为 8 mm,将树脂均匀地淋在碳布、C4、C3、C2、C1 的正面,单面淋胶,单面用胶量为 772~925 g/m²。按从下至上为 C4、C3、C2、C1 的顺序,将 4 层泡沫粘接复合,再在最底层粘接 0.2 mm 碳布,最面层粘接 0.5 mm 玻璃钢板。使用热压辅助成形系统将复合材料热压成形,设置压力为 3 MPa,温度为 60 °C,热压成形时间为 5~6 h。将成形后的复合材料,切割成尺寸为 300 mm×300 mm 的正方形。最后将聚氨酯面漆及其固化剂按 4:1 的质量比配料,均匀喷涂于复合材料正面及 4 条棱边,涂层厚度控制在 30~40 μm,编号为 1#样品。制备工艺流程如图 1 所示,复合材料结构如图 2 所示。用硬质聚氯乙烯泡沫 PMN 替代硬质聚氨酯泡沫 C1,制备工艺与 1#样品相同,编号为 2#样品。将硬质聚氨酯泡沫 C4、C3、C2、C1 分别进行热处理工艺,置于 120 °C 烘箱中,烘烤 48 h,再使用聚氨酯树脂与配套固化剂按质量比 10:3 配料,其余工序同 1#样品,编号为 3#样品。

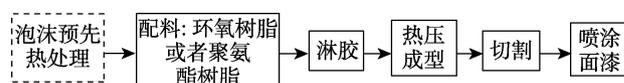


图1 复合材料制备工艺

Fig.1 Preparation process of composites

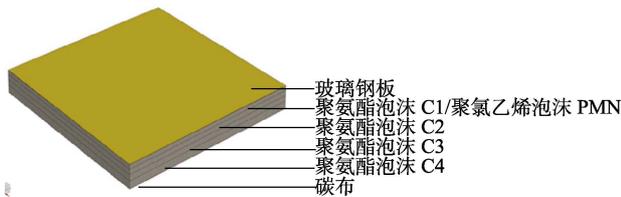


图 2 复合材料结构
Fig.2 Structure diagram of composites

2 试验

2.1 自然环境试验

拉萨地处青藏高原腹地, 海拔 3 648.7 m, 是世界上海拔较高的城市之一。拉萨属典型高原强辐射、低气压气候。全年日照时数为 3 006.7 h, 总辐射量为 8 469.07 MJ/m², 是我国著名的日光城。拉萨 2021 全年平均气压为 650.1 hPa, 而同时期的敦煌为 881.9 hPa, 漠河为 951.2 hPa, 重庆为 939.4 hPa, 可见拉萨因海拔较高, 大气稀薄, 气压明显偏低。平均气温低, 日温差大, 2021 年平均温度为 9.8 °C, 最大月温差为 33.1 °C, 最小月温差为 18.3 °C, 说明该地区全年气温偏低, 昼夜温差大。降雨偏少, 空气较为干燥, 干湿季明显, 年均湿度为 39%, 年降水量为 507.6 mm, 主要集中在 5—9 月份。

将制备的 1#、2#、3#复合材料样品在拉萨试验站开展大气户外暴露自然环境试验, 并按试验周期对样品外观、变形量开展性能检测, 具体试验方式见表 2。

2.2 性能测试及表征

利用体式显微镜观察硬质聚氨酯/聚氯乙烯泡沫

表 2 复合材料自然环境试验方式

Tab.2 Natural environment test methods for composites

试验环境	样品数量	试验方式	暴露角度	检测项目	取样周期
拉萨试验站	3 块	大气户外暴露	朝南 45°	外观、变形量	0、180 d

表观结构。利用三坐标测量仪检测雷达吸波复合材料直线度误差。利用扫描电镜分析泡沫微观形貌。利用热裂解仪联合气质联用仪, 对雷达吸波复合材料开展热裂解气相色谱质谱联用检测。利用拉伸试验机, 针对硬质聚氨酯/聚氯乙烯泡沫与环氧/聚氨酯树脂间的粘接强度进行表征。为表征硬质聚氨酯泡沫热膨胀量变化, 使用电热鼓风干燥箱控制加热试验温度, 利用精度为 0.02 mm 的游标卡尺检测试验前后样品的尺寸。

3 结果及分析

3.1 复合材料宏观形貌分析

复合材料在经历 180 d 自然环境试验后, 1#、2#样品在拉萨试验站均已出现宏观形貌损伤, 表现为鼓包、脱粘分层、变形。1#、2#样品的鼓包现象存在差异, 1#正面鼓出数个大小不等的大包, 背面无鼓包发生; 2#正面产生连续、密集小泡, 背面鼓出大小不等的大包, 跟 1#正面鼓包现象类似。3#样品在拉萨试验站经历 180 d 自然环境试验后, 宏观形貌均无明显变化, 如图 3 所示。

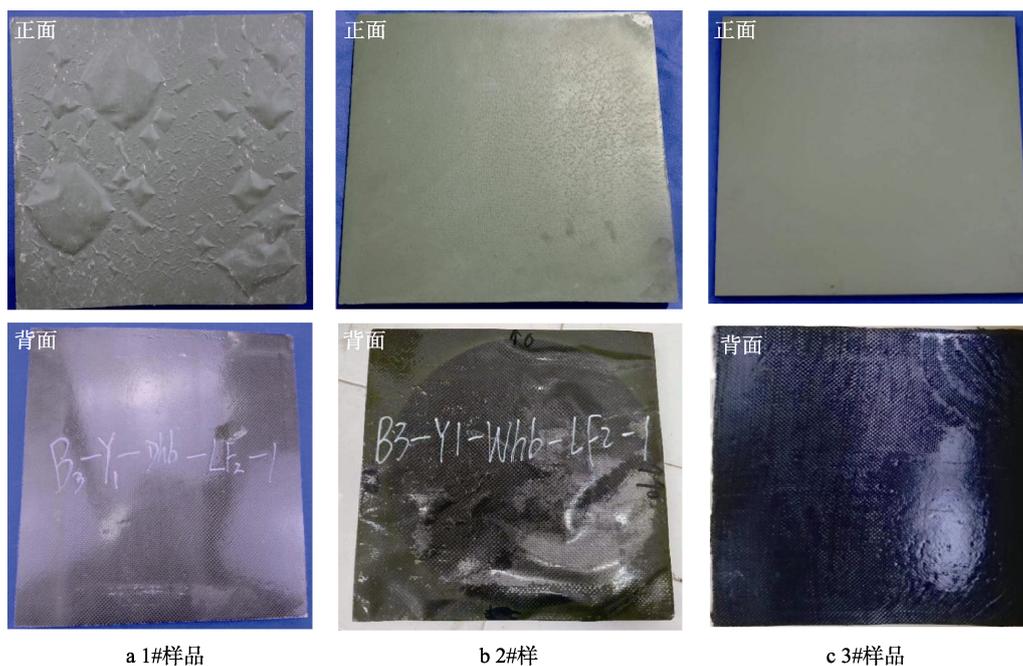


图 3 复合材料宏观形貌
Fig.3 Macro morphologies of composites: a) 1#sample; b) 2# sample; c) 3# sample

3.2 复合材料变形量检测与分析

180 d 自然环境试验后, 样品直线度误差的测量结果见表 3, 用于表征样品变形量^[18]。分别对每块样品的 4 条边进行测量, 量值越大, 代表变形越严重, 理想中的完美直线测量值为 0 mm。1#样品的直线度误差为 6.129 4~7.368 1 mm, 2#为 3.583 3~4.912 4 mm, 表明均已发生变形, 变形形状为四边上翘, 中间凹陷。3#样品的直线度误差测量值与原始值(试验前测量值)基本吻合, 表明试验过程中, 并未发生变形现象。

表 3 复合材料变形量测试结果
Tab.3 Deformation test results of composites

样品类型	直线度误差/mm			
1#	6.346 7	6.129 4	6.933 8	7.368 1
2#	4.823 1	3.794 5	3.583 3	4.912 4
3#	0.367 9	0.323 5	0.353 2	0.362 5

3.3 硬质泡沫形貌表征与分析

聚氨酯泡沫 C4、C3、C2、C1 的微观形貌(SEM)如图 4 所示。泡沫内部结构是由聚醚多元醇与异氰

酸酯在发泡剂的作用下发泡形成的, 泡孔结构呈闭孔型^[19-21]。由图 4 可见, 泡孔形貌较为完整, 泡孔分散均匀, 泡孔壁完整封闭。在发泡过程中, 闭孔泡孔内残存的气体, 在气压、温差等环境效应下加速气体向外释放, 引起复合材料外观失效。

1#复合材料样品从下至上是由 C4、C3、C2、C1 聚氨酯泡沫构成, 2#复合材料样品从下至上是由 C4、C3、C2、PMN 聚氨酯/聚氯乙烯泡沫构成, 2 种材料之间的差异是面层泡沫 C1 与 PMN 的不同。显微镜观察下的泡沫微观结构如图 5 所示。可见, C1、C4 存在不少较大空洞, 而 PMN 在显微镜下未见明显空洞, 说明 PMN 材料比 C1、C4 更致密。泡沫结构内的残存气体在环境效应下释放时, 气体质量轻, 向上运动。因此, 1#样品表层出现较大鼓包, 而底层未见鼓包现象; 而 2#样品由于面层泡沫的致密性, 抵挡了气体的释放, 因此材料底层出现鼓包, 而面层仅有连续的密集小凸起。

3.4 复合材料内部气体成分分析

复合材料热裂解气相色谱质谱联用(GCMS)检测结果见图 6 和表 4。其中, 氮气、二氯一氟乙烷、甲基膦酸二甲酯为复合材料在 100 °C 裂解后的主要气体成分, 分别占了全部检测气体成分的 46.87%、

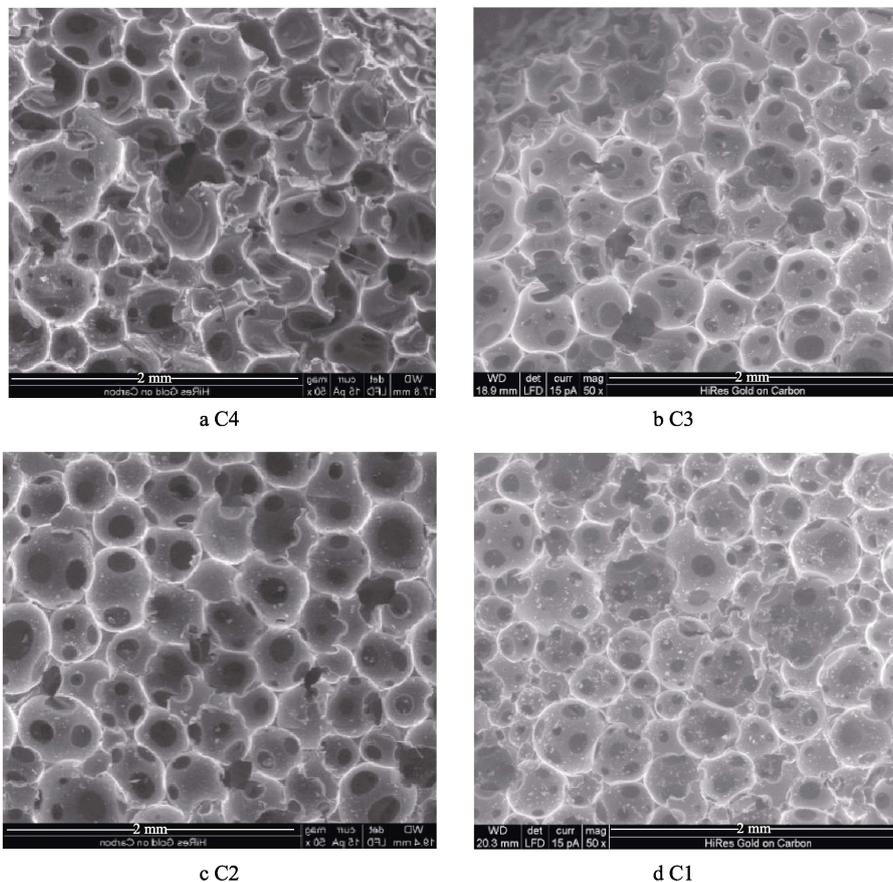


图 4 硬质泡沫 SEM 形貌
Fig.4 SEM morphologies of rigid foams

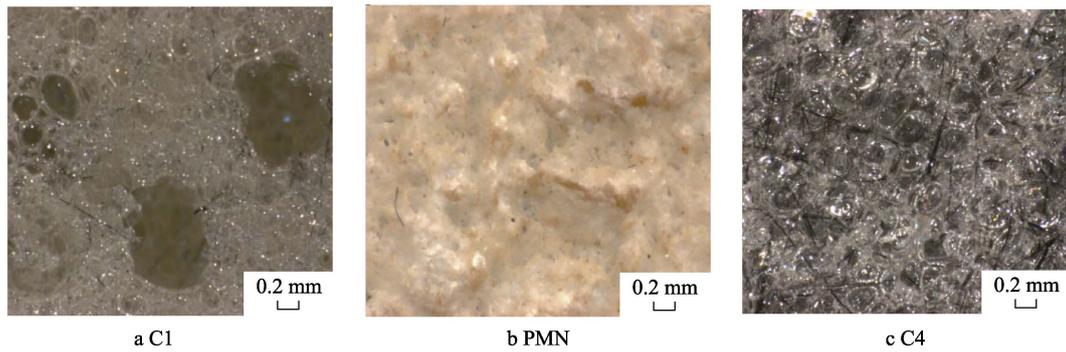


图 5 硬质泡沫的显微形貌
Fig.5 Micrographs of rigid foams

表 4 复合材料峰表 TIC 结果
Tab.4 TIC results of peaks for composites

峰号	峰面积 占比/%	峰高 占比/%	名称
1	46.87	31.17	Nitrogen
5	28.90	31.04	1,1-Dichloro-1-fluoroethane
21	19.39	31.73	Dimethyl methylphosphonate

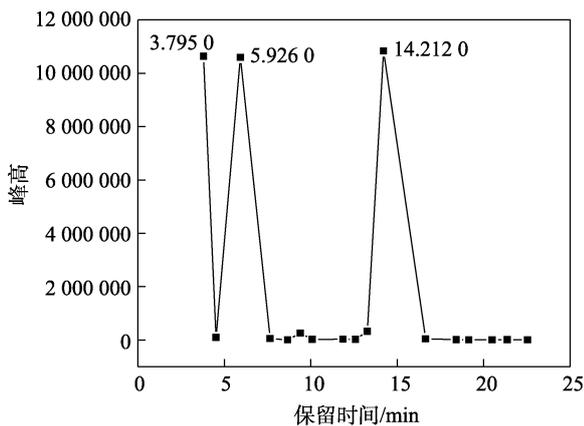


图 6 复合材料 GCMS 谱图结果
Fig.6 GCMS spectrum results of composites

28.90%、19.39%。因此, 聚氨酯发泡后闭合泡孔内残余气体主要来自空气, 以及配方中的添加物二氯一氟乙烷(发泡剂)及甲基膦酸二甲脂(阻燃剂)。

3.5 硬质泡沫热膨胀量随温度变化规律

聚氨酯泡沫 C1、C2、C3、C4 膨胀量随温度的变化曲线如图 7 所示, 膨胀量变化百分数的计算如式(1)所示^[22-24]。

$$dL / L_0 = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_t 为样品变化后长度, L_0 为样品原始长度。

由图 7 可见, 试验分为 80~120 °C 升温和 120~80 °C 降温 2 个过程。在升温过程中, C1、C2、C3、C4 材料的体积随温度的升高均明显收缩变小, 并且每种材料的热膨胀量变化百分数表现出明显差异。在 120 °C 时, C1 为 -2.8%, C2 为 -2.46%, C3 为 -1.82%, C4 为 -1.75%。

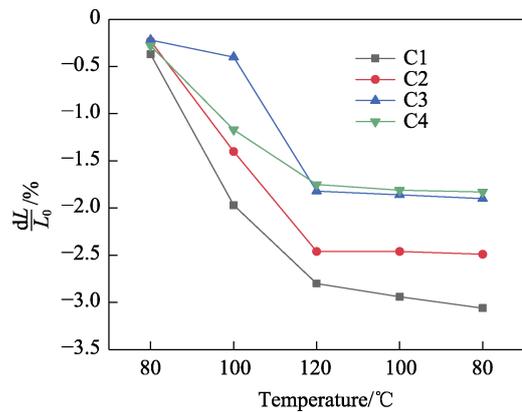


图 7 硬质泡沫膨胀量变化百分数
Fig.7 Percent change of heat expansion for rigid foams

4 种材料均出现了比较少见的随温度升高体积收缩的现象, 也说明了泡沫内残留的气体随温度升高而快速释放, 致使材料收缩。构成复合材料的 4 层泡沫热膨胀量差异较大是导致材料在环境效应下出现变形损伤的根本原因之一。面层 C1 在 4 种泡沫材料中的收缩量最大, 中间层 C2 次之, 而底层 C3、C4 的收缩量较小, 这是造成复合材料四周上翘、中间凹陷变形形状的原因。

在 120~80 °C 降温过程中, 4 种材料的热膨胀量变化逐渐趋向稳定。在 100~80 °C, 材料体积基本已经保持不变, 其中 C1 的变化量为 0.12%、C2 为 0.03%、C3 为 0.04%、C4 为 0.02%。

在降温过程中, 材料体积稳定或小幅变化, 说明泡沫材料可以通过预先时效处理, 实现不继续或减少气体释放, 保持状态稳定。因此, 3# 复合材料样品通过对 4 种泡沫原材料进行 120 °C、48 h 烘烤预先热处理, 实现了多层泡沫复合材料在环境效应下热膨胀变化量稳定, 是解决外观变形、鼓包等损伤失效的有效技术途径。

3.6 胶黏剂对有效复合强度的影响规律

将构成复合材料的 4 层聚氨酯泡沫 C1、C2、C3、C4 分别制备 3 件拉伸件, 1 件保持原样, 另外 2 件在拉伸件中间处切断, 并使用环氧或聚氨酯树脂及其配

套固化剂进行粘黏,单位面积用量同复合材料样品制备工艺一致,再开展拉伸测试,结果见表5。

表5 硬质聚氨酯泡沫拉伸测试结果
Tab.5 Tensile test results for rigid polyurethane foams

泡沫型号	粘黏树脂	断裂强度/N	备注
C1	—	63	材料自身拉伸强度
	环氧树脂	41	树脂粘黏处断裂
	聚氨酯树脂	54	材料处断裂
C2	—	82.5	材料自身拉伸强度
	环氧树脂	49.5	树脂粘黏处断裂
	聚氨酯树脂	71.5	树脂粘黏处断裂
C3	—	55.5	材料自身拉伸强度
	环氧树脂	52	树脂粘黏处断裂
	聚氨酯树脂	54	材料处断裂
C4	—	96	材料自身拉伸强度
	环氧树脂	41	树脂粘黏处断裂
	聚氨酯树脂	81	树脂粘黏处断裂

由表5可见,4种型号聚氨酯泡沫材料自身存在拉伸强度差距,C4、C2分别达到了96、82.5 N,而C1、C3断裂强度分别为63、55.5 N。不同树脂体系与相同泡沫材料之间也表现出较大差异,聚氨酯树脂与4种材料的粘黏强度均比环氧树脂更强,环氧树脂与4种材料的粘黏强度在41~52 N,而聚氨酯树脂达到了54~81 N。环氧树脂与泡沫粘黏强度均小于材料自身的拉伸强度,而聚氨酯树脂与自身强度较小的C3、C12粘黏时,已大于了材料自身的拉伸强度,因为拉伸测试结果断裂处在材料本身,而不是树脂粘黏处。

复合材料内部层间材料是通过树脂进行粘黏复合的,1#、2#样品使用的是环氧树脂体系,3#样品采用的是聚氨酯树脂体系,因此3#样品的层间粘黏强度得到了有效提升。复合材料释放残余气体所产生的作用力,若大于材料层间有效粘黏强度,就产生了脱胶分层、鼓包、变形等外观问题;而复合材料层间有效粘黏强度大于气体释放作用力时,能抵御住气体的释放,将气体继续封闭在材料内部,继而解决了由气体释放导致的外观失效。

4 结论

1) 雷达吸波复合材料在拉萨站开展6个月自然环境试验后,1#、2#样品出现鼓包、变形、脱黏分层等严重外观失效,并且存在较大变形量;而3#样品均无明显外观损伤,成功控制了外观失效问题。

2) 雷达吸波复合材料是由多层硬质泡沫粘黏复合而成,而泡沫的微观结构是由发泡工艺形成的密闭气孔构成,气孔内残存的气体成分主要来自空气、二氯一氟乙烷(发泡剂)及甲基磷酸二甲脂(阻燃剂)。

在环境效应下,气体释放的作用力大于层间胶黏强度时,便产生了鼓包、分层脱黏等外观损伤。

3) 4层泡沫的热膨胀变化量均存在差别,面层热收缩量最大、中间层次之、底层收缩量最小,是导致复合材料变形及变形方向为中间下凹、四周上翘的原因。

4) 多层泡沫复合材料进行时效处理后,泡沫热膨胀变形量处于稳定状态,能有效控制材料变形。通过提升层间胶黏剂的粘黏强度,可以有效抵制气体释放作用力,是解决复合材料外观失效、提升环境适应性的有效技术途径。

参考文献:

- [1] 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 Juan, DENG Jing-lan, WANG Ji-hui. Preparation and Wave Absorbing Characteristics of Polyurethane Foam Core Sandwich Composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2010, 35(2): 19-22.
- [2] 沈国柱,徐政,蔡瑞琦. 短切碳纤维-铁氧体填充的复合材料吸波性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 933-936.
SHEN Guo-zhu, XU Zheng, CAI Rui-qi. Radar Absorbing Properties of Composites Filled with Short Carbon Fiber-Ferrite[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(7): 933-936.
- [3] 沈国柱,徐政,李轶. 短切碳纤维复合材料对8mm波吸收性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(3): 19-20.
SHEN Guo-zhu, XU Zheng, LI Yi. Study on Absorbing Properties of Composites Filled with Chopped Carbon Fiber at Bands of 8 mm[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(3): 19-20.
- [4] 黄小忠,黎炎图,余维敏,等. 短切磁性碳纤维泡沫复合材料吸波性能研究[J]. 磁性材料及器件, 2010, 41(5): 15-18.
HUANG Xiao-zhong, LI Yan-tu, YU Wei-min, et al. Radar Absorbing Properties of Composite Foam Filled with Short Magnetic Carbon Fiber[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2010, 41(5): 15-18.
- [5] 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]. 宇航材料工艺, 2009, 39(1): 1-4.
HU Ai-jun, WANG Zhi-yuan, JIN Zheng, et al. Advances in Foam Core Sandwich Structure Composites with Absorbing Stealth Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(1): 1-4.
- [6] 程刚,陈宏书,胡志毅,等. 硬质聚氨酯泡沫塑料在伪装工程中的应用研究[J]. 材料导报, 2010, 24(S1): 200-203.
CHENG Gang, CHEN Hong-shu, HU Zhi-yi, et al. Application Research of Rigid Polyurethane Foam in Camouflage Engineering[J]. Materials Review, 2010, 24(S1):

- 200-203.
- [7] 郭宇, 贾晓敏, 张堉昆, 等. 雷达吸波聚合物基体材料研究概况[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(8): 133-137.
GUO Yu, JIA Xiao-min, ZHANG Yuan-kun, et al. Research Situation of Radar Wave-Absorbing Polymer Matrix Material[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8): 133-137.
- [8] 付步芳, 王利. 聚氨酯泡沫塑料基吸波材料及其应用[J]. 材料开发与应用, 2000, 15(6): 38-42.
FU Bu-fang, WANG Li. Foamed Polyurethane and Its Application in Electromagnetic Absorption[J]. Development and Application of Materials, 2000, 15(6): 38-42.
- [9] 张政权, 李铁虎, 经德齐. 雷达吸波材料的研究现状及其进展[J]. 材料导报, 2007, 21(S1): 307-309.
ZHANG Zheng-quan, LI Tie-hu, JING De-qi. Present Status and Perspectives of the Radar Absorbing Material[J]. Materials Review, 2007, 21(S1): 307-309.
- [10] 樊迪刚, 李新涛, 胡益民, 等. 聚丙烯泡沫/铁氧体复合吸波材料研制及应用[J]. 安全与电磁兼容, 2021(1): 57-61.
FAN Di-gang, LI Xin-tao, HU Yi-min, et al. Development and Application of Polypropylene Foam/Ferrite Composite Absorbing Material[J]. Safety & EMC, 2021 (1): 57-61.
- [11] 李晶晶, 田启祥, 邹南智, 等. 结构型碳纤维吸波复合材料的研究及应用[J]. 纤维复合材料, 2012, 29(2): 7-10.
LI Jing-jing, TIAN Qi-xiang, ZOU Nan-zhi, et al. Research and Application Development of Carbon Fiber Reinforced Structural Microwave-Absorbing Composite Materials[J]. Fiber Composites, 2012, 29(2): 7-10.
- [12] 潘存业, 杨智丽, 李德恒. 增量填充改性聚氨酯泡沫的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(S1): 51-54.
PAN Cun-ye, YANG Zhi-li, LI De-heng. Preparation and Property of Modified PUR Foam with Incremental Filler[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(S1): 51-54.
- [13] 陈良, 邓龙江, 谢建良, 等. 一种宽带多层泡沫吸波材料及其制备方法: CN1929731A[P]. 2007-03-14.
CHEN Liang, DENG Long-jiang, XIE Jian-liang. Broad Band Multilayer Foam Wave-Suction Material and Method for Making Same: CN1929731A[P]. 2007-03-14..
- [14] DA SILVA MACEDO J A, DE SOUSA M J, DMITRIEV V. Optimization of Wide-Band Multilayer Microwave Absorbers for Angle of Incidence and Arbitrary Polarization[C]// SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics. Brasilia: IEEE, 2006.
- [15] 彭益菲. C_f /聚氨酯泡沫宽频吸波复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
PENG Yi-fei. Preparation and Properties of C_f /Polyurethane Foam Broadband Microwave Absorbing Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [16] 何山, 熊克敏. 雷达罩内用泡沫型吸波材料研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(3): 19-23.
HE Shan, XIONG Ke-min. Application of a Foam RAM in the Radome[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(3): 19-23.
- [17] 贺龙辉, 胡照文, 邓联文, 等. 宽频高性能短切碳纤维/聚氨酯泡沫吸波材料制备[J]. 功能材料, 2015, 46(23): 23120-23123.
HE Long-hui, HU Zhao-wen, DENG Lian-wen, et al. Study Onwide-Band Wave-Absorbing Foam Material Prepared by Shortened Carbon Fiber and Polyurethane[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(23): 23120-23123.
- [18] 张露. 三坐标测量机在产品质量检测中的应用[D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
ZHANG Lu. The Application of Coordinate Measuring Machine in Product Quality Inspection[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2017.
- [19] 刘浩, 韩常玉, 董丽松. 闭孔泡沫塑料结构与性能研究进展[J]. 高分子通报, 2008(3): 29-42.
LIU Hao, HAN Chang-yu, DONG Li-song. Research Progress in Structure-Properties Relationships of Closed Cell Polymer Foams[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2008 (3): 29-42.
- [20] 胡冬冬, 吕佳逊, 刘涛, 等. 泡孔结构形貌对环氧树脂发泡材料抗压性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(7): 60-65.
HU Dong-dong, LYU Jia-xun, LIU Tao, et al. Effect of Cell Morphologies on Compressive Properties of Epoxy Resin Foam[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(7): 60-65.
- [21] 梁书恩. 聚氨酯泡沫塑料泡孔结构与力学性能关系的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
LIANG Shu-en. Study on the Relationship between Cell Structure and Mechanical Properties of Polyurethane Foam[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005.
- [22] 翟建军, 王露晨, 孔祥霞. 三维多向编织复合材料温度效应综述: 热传导、热膨胀性质和力学响应[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2459-2478.
ZHAI Jun-jun, WANG Lu-chen, KONG Xiang-xia. A Review on Temperature Effect of 3D Multi-Directional Braided composites: Heat Conduction, Thermal Expansion Properties and Mechanical Response[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2459-2478.
- [23] ZHANG De-ke, CAO Ying-bin, LIU Rong-jun, et al. Effect of 3D-Braided Structure on Thermal Expansion of PIP- C_f /SiC Composites[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2014, 52(11): 722-726.
- [24] 成玲. 碳/环氧编织复合材料热膨胀特性分析[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(1): 108-111.
CHENG Ling. Thermal Expansion Coefficients of Carbon/Epoxy Braided Composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010, 33(1): 108-111.