DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.03.059

PMI 泡沫收缩率及胶接性能试验研究

成艳娜^{1,*},刘向阳¹,王永红²

1. 中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司,陕西西安710089

2. 西飞公司军事代表室,陕西 西安 710089

摘 要:通过对 PM 泡沫芯密度、厚度及外置时间、干燥处理、固化压力等 5 个参数系统研究,摸索了其与泡沫芯收缩率之间的关系,给出了降低泡沫芯收缩率、提高其尺寸稳定性的方法。同时,通过强度性能试验,研究了不同固化压力(0.2MPa 和 0.3MPa) 对 PM 泡沫夹层试验件胶接性能的影响。试验结果表明,泡沫芯厚度越小,密度越低,吸湿量越大,固化压力越大,则泡沫芯收缩率越高。利用烘箱在 130℃下干燥处理 2h,可降低泡沫芯的收缩率,0.3MPa 胶接的 PM 泡沫夹层结构试验件的 滚筒剥离强度略优于 0.2MPa 固化压力。剪切强度、平面拉伸强度及弯曲强度无明显差别。

关键词:PM 泡沫,收缩率,胶接性能,干燥处理,固化压力

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 03-0059-06

近年来,随着复合材料蜂窝夹层结构在使用过程中暴露出的维护费用高、吸潮变形、脱胶、使用寿命短等一系列问题,国内外航空航天领域的研究人员将目光转向了高性能的聚合物泡沫塑料芯材,主要是聚甲基丙烯酰亚胺泡沫塑料,即 PMI 泡沫塑料。

PMI 是一种交联、闭孔的硬质泡沫塑料,孔径分布均匀一 致,吸湿率低、力学性能为各向同性。在同密度的情况下,具有 比其他聚合物泡沫塑料更高的抗压缩强度和刚度,以及更高的 抗高温蠕变性能和尺寸稳定性^[1]。PMI 泡沫可采用机械加工成 型、真空辅助热成型等成型方式,可承受玻璃纤维/环氧、碳纤 维/环氧、碳纤维/双马等树脂基复合材料的中、高温固化工艺 条件,实现泡沫夹芯与预浸料的一步共固化成型。另外,泡沫芯 材还能直接用于各种液体树脂成型工艺,得到表面光滑平整、无 需填充胶加强的整体制件^[24]。常见的航空复合材料泡沫夹层 结构有机翼前缘、方向舵、起落架舱门、翼身和翼尖整流罩等。

PMI泡沫在加热加压状态下会产生一定程度的收缩。 对于泡沫夹层复合材料制件来说,在一定的温度和压力载荷 下,泡沫芯收缩会影响制件的尺寸稳定性,甚至造成泡沫夹 层结构复材制件产生脱粘。另外, PMI 泡沫作为夹芯材料 使用时,与上下面板之间通过胶膜胶接。固化压力会影响泡 沫夹层结构件的胶接质量。因此,有必要针对 PMI 泡沫在 加热加压状态下的收缩率及胶接性能开展系统研究。

通过制作平板泡沫夹层试验件,研究泡沫芯密度、厚度 及外置时间、干燥处理、固化压力对 PMI 泡沫收缩率的影 响。通过强度性能试验,研究不同固化压力对 PMI 泡沫夹 层试验件胶接性能的影响。

1 试验件设计

1.1 **原材料**

试验件的原材料采用 PMI 泡沫,由德国 Degusssa 公司 生产,规格为 Rohacell 71WF-HT 和 Rohacell 110WF-HT,碳 纤维预浸料为 CYCOM 970/T300 12 NT;胶膜为 FM300K。

1.2 试验件制备

(1) 收缩率试验件

收缩率试验采用 Rohacell 71WF-HT 和 Rohacell 110WF-HT 两种规格泡沫芯。试验件尺寸为 200mm×150mm× 厚

收稿日期:2016-12-19; 退修日期:2017-01-10; 录用日期:2017-02-10

^{*} 通讯作者 . Tel.: 029-86883587 E-mail: 284694452@qq.com

引用格式: CHENG Yanna, LIU Xiangyang, WANG Yonghong. Study on shrinkage ratio and bonding property of PMI foam[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (03): 59-64. 成艳娜,刘向阳,王永红. PMI 泡沫收缩率及胶接性能试验研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (03): 59-64.

度。Rohacell 71WF-HT 的厚度为 12.7mm,25mm,50mm,75mm, Rohacell 110WF-HT 的厚度为 25mm,50mm,100mm,120mm。 每种规格每种厚度的试验件共 5 件。按照图 1 流程分别制 备试验件。



图 1 加热加压下的收缩率试验件制备流程 Fig.1 Manufacturing process of shrinkage property samples under drying and pressure

(2) 胶接性能试验件

胶接性能通过强度性能试验进行评估。强度性能试验件为夹层结构,面层为CYCOM 970/T300 12 NT,夹层为 Rohacell 71WF-HT,胶膜为FM300K,铺层顺序为:面

层/胶膜/泡沫芯/胶膜/面层。试验件分为两组,分别按照 0.2MPa 和 0.3MPa 压力固化。试验件种类及测试方法如表 1 所示。其中,用于滚动剥离强度试验的 8 件试件中,前 4 件测试靠模面,后 4 件测试靠袋面。

表 1 胶接性能试验件清单 Table 1 Samples list for bonding property

试验件名称	试验件尺寸 / mm×mm×mm	试验件 数量	测试方法
剪切强度	$150 \times 60 \times 12.7$	6	ASTM C273
弯曲强度	$500 \times 60 \times 22.48$	5	ASTM C393
平面拉伸强度	$50 \times 60 \times 22.48$	5	ASTM C297
滚筒剥离强度	305×76×(12.7+面板厚)	8	ASTM D1781

2 试验结果及分析

2.1 收缩率试验

采用卡尺测量处理前后试验件长、宽、厚3个方向的尺 寸,计算加压前后泡沫试验件的收缩率。泡沫试验件尺寸公 差标准按照 HB5800 中的机加切削件,极限收缩率等于极限 偏差 / 泡沫试样尺寸 × 100%。测试结果如表 2、表 3 所示。

表 2 Rohacell 71WF-HT 加热加压下的收缩率试验结果 Table 2 Experimental results of Rohacell 71WF-HT shrinkage property samples under drying and pressure

		长度方向			宽度方向			厚度方向		
泡沫厚度/ mm	标记	标记 收缩率 /%	率 /%	极限收缩率/			极限收缩率/	收缩	收缩率 /%	
	-	0.2MPa	0.3MPa	%	0.2MPa	0.3MPa	%	0.2MPa	0.3MPa	%
	1	0.04	0.15		0.17	0.19		1.15	1.87	
	2	0.15	0.12		0.20	0.13		1.47	2.03	
12.7	3	0.03	0.02	0.28	0.21	0.20	0.33	1.02	1.73	1.65
	4	0.11	0.08		0.19	0.20		1.39	2.19	
	5	0.11	0.05		0.23	0.13		1.74	2.27	
	1	0.27	0.14		0.16	0.19		0.32	1.35	
	2	0.11	0.16		0.23	0.13		0.68	1.51	
25	3	0.08	0.14	0.28	0.14	0.09	0.33	0.48	1.12	1.04
	4	0.03	0.04		0.07	0.19		0.80	1.51	
	5	0.12	0.09		0.17	0.09		0.40	1.67	
	1	0.12	0.14		0.16	0.19		0.44	0.62	
	2	0.15	0.23		0.15	0.20		0.48	0.64	
50	3	0.20	0.18	0.28	0.15	0.22	0.33	0.36	0.58	0.62
	4	0.17	0.26		0.19	0.33		0.52	0.80	
	5	0.12	0.24		0.25	0.07		0.48	0.84	
	1	0.21	0.04		0.16	0.17		0.24	0.64	
	2	0.15	0.27		0.12	0.15		0.19	0.63	
75	3	0.11	0.16	0.28	0.04	0.05	0.33	0.19	0.51	0.49
	4	0.13	0.17		0.29	0.10		0.37	0.64	
	5	0.14	0.06		0.17	0.19		0.66	0.77	

泡沫厚度/ mm 标i		长度方向						厚度方向		
	标记	收缩	率 /%	极限收缩率/	收缩	率 /%	极限收缩率/	收缩	率 /%	极限收缩率/
	-	0.2MPa	0.3MPa	%	0.2MPa	0.3MPa	%	0.2MPa	0.3MPa	%
	1	0.04	0.22		0.17	0.25		0.23	0.34	
	2	0.17	0.15		0.13	0.16		0.36	0.40	
25	3	0.10	0.02	0.28	0.13	0.09	0.33	0.24	0.28	1.04
	4	0.09	0.04		0.24	0.09		0.64	0.99	
	5	0.09	0.06		0.25	0.37		0.96	1.15	
	1	0.15	0.19		0.16	0.12		0.40	0.36	
	2	0.15	0.09		0.17	0.07		0.12	0.08	
50	3	0.04	0.13	0.28	0.13	0.07	0.33	0.32	0.40	0.62
	4	0.18	0.12		0.20	0.11		0.36	0.32	
	5	0.24	0.12		0.44	0.19		0.52	0.52	
	1	0.06	0.16		0.12	0.20		0.24	0.30	
	2	0.15	0.13		0.27	0.08		0.30	0.28	
100	3	0.27	0.09	0.28	0.17	0.07	0.33	0.22	0.14	0.43
	4	0.14	0.16		0.16	0.11		0.34	0.36	
	5	0.10	0.10		0.16	0.13		0.44	0.30	
	1	0.13	0.08		0.11	0.16		0.17	0.23	
	2	0.13	0.04		0.11	0.11		0.20	0.25	
120	3	0.12	0.11	0.28	0.15	0.15	0.33	0.15	0.17	0.35
	4	0.20	0.21		0.12	0.17		0.18	0.19	
	5	0.22	0.16		0.15	0.15		0.23	0.22	

表3 Rohacell 110WF-HT 加热加压下的收缩率试验结果

Table 3 Experimental results of Rohacell 110WF-HT shrinkage property samples under drying and pressure

从表 2、表 3 的试验数据可以看出:

(1) 密度越大,收缩率越小

同等厚度经过相同的外置或干燥处理, Rohacell 110WF-HT 的泡沫芯比 Rohacell 71WF-HT 的泡沫芯收缩率小,说明 泡沫芯密度大则同等处理条件下其收缩率小。例如 0.3MPa 压力下,厚度 25mm 标记为 5 的 Rohacell 110WF-HT 厚度 方向的收缩率为 1.15%,而同等条件下标记为 5 的 Rohacell 71WF-HT 厚度方向的收缩率为 1.67%。

(2) 外置时间越长收缩率越大,厚度越大,收缩率越小

随着外置时间的增加,加热加压处理后泡沫芯试验件 收缩率相应增大,随着厚度的增加,外置时间对泡沫芯收缩 率的影响逐渐减弱。这主要是由于 PMI 泡沫的化学方程式 中存在有对位的酰亚胺基因,将其外置在一定的环境条件下 时(包括温度和湿度)会吸潮。随着外置时间从0增加到 48h,泡沫芯内部的含水量增大,含水量越大则加热加压状 态下的收缩率越大。同时,PMI泡沫是闭孔结构,吸湿的机 理是纯粹的扩散过程,水局限于泡沫表面附近2mm 左右, 而泡沫内部仍是干的,没有水分进入^[5]。对于厚度较大的泡 沫芯,其外部泡沫芯吸潮后,水分不会进一步渗透到芯层中 间部位,因此,泡沫芯厚度越大,加热加压下的收缩率相对 较小。

(3) 干燥处理可降低泡沫芯收缩率

泡沫试验件干燥处理工艺为:将泡沫芯零件放置在平 板工装上,如图 2 所示,在烘箱内经 130℃热处理 2h。待冷 却后封袋并在袋内放入防潮砂。从表 2、表 3 中数据可知, 经过烘箱干燥的泡沫芯 (标记为 3)在加热加压状态下的收 缩率相对外置 (标记为 4、5)、机加后直接封袋 (标记为 1、2) 的泡沫芯收缩率降低,证明干燥处理可提高泡沫芯的尺寸稳 定性。



图 2 烘箱干燥后的泡沫芯 Fig.2 Foams after drying in oven

(4) 压力越大,收缩率越大 加压处理后的泡沫芯如图 3 所示。



图 3 加压处理后的泡沫芯 Fig.3 Foams cured in autoclave

从表 2、表 3 可以看出,0.3MPa 压力下的同种规格泡沫 收缩率比 0.2MPa 压力下的泡沫收缩率大。在试验中发现, 无论是 110-WF-HT 规格还是 71-WF-HT 规格,0.3MPa 压力 下的泡沫都比 0.2MPa 压力下变形大。0.2MPa,0.3MPa 固 化压力下试验件的变形如图 4、图 5 所示。对比图 4、图 5 可 以发现,0.2MPa 压力下泡沫外形基本无变形,0.3MPa 压力 下泡沫外形棱边已成弧形,边角也有圆弧。这种变形随厚度 增加逐渐减弱,厚度为 25mm、50mm 变形明显,60mm 以上 则变形不明显。



图 4 0.2MPa 固化压力的泡沫芯 Fig.4 Foam cured with 0.2MPa pressure



图 5 0.3MPa 固化压力的泡沫芯 Fig.5 Foam cured with 0.3MPa pressure

(5)长宽方向收缩率小,厚度方向收缩率大

无论是 110-WF-HT 规格还是 71-WF-HT 规格,泡沫芯 试验件长度及宽度方向的尺寸在加压前后变化较小,其中, 长度方向收缩率小于极限收缩率 0.28%,宽度方向收缩率 小于 0.33%,符合 HB5800 的公差要求。而厚度方向收缩率 较大,如 Rohacell 71WF-HT 的 4 种厚度 (12.7mm, 25mm, 50mm, 75mm)在 0.3MPa 下的收缩率均超过 HB5800要 求,说明 0.3MPa 固化压力会造成 Rohacell 71WF-HT 规格泡 沫芯在厚度方向尺寸超差。Rohacell 110WF-HT 厚度 25mm 的泡沫芯试验件在 0.3MPa 下尺寸超差,其余符合 HB5800 要求。

2.2 胶接性能试验

采用热压罐固化方式成型时,固化压力的变化对试验 件的尺寸稳定性、力学性能、孔隙率等都会产生影响。因此, 不同固化压力对 PMI 泡沫夹层试验件力学性能影响的结 果,是评价固化压力是否合适的重要标准。对设计的固化 后试验件的力学性能进行测试分析,其弯曲强度、平面拉伸 强度、剪切强度、滚筒剥离强度试验结果如表 4~表 7 所示。 其中,弯曲强度试验的合格标准为不低于 15MPa,其余试验 的合格标准为破坏不发生在胶膜处。

表 4 弯曲强度测试结果 Table 4 Bending strength test results

	弯曲强度 /MPa			
试验件编号	固化压力 0.2MPa	固化压力 0.3MPa		
1	155.65	155.03		
3	156.96	152.85		
4	155.68	153.33		
5	158.93	155.01		
平均值	157	154		

表 5 平面拉伸强度测试结果

Table 5 Plane tensile strength test results

	平面拉伸强度 /MPa			
试验件编号	固化压力 0.2MPa	固化压力 0.3MPa		
1	2.19	2.22		
2	2.35	1.94		
3	1.77	1.67		
4	2.49	1.86		
5	2.27	2.37		
平均值	2.2	2.0		

耒 6

Table 6 Shear strength test result					
	剪切强	截度 /MPa			
验件编号	固化压力	固化层			

前切强度测试结果

试验件编号	固化压力	固化压力	
	0.2MPa	0.3MPa	
1	1.09	0.93	
2	0.83	1.05	
3	0.88	1.11	
4	1.04	0.92	
5	1.04	0.96	
6	0.98	0.96	
平均值	0.98	0.99	

表 7 滚筒剥离强度测试结果 Table 7 Roll pell strength test results

靠模面 试验件 - 编号	滚筒剥 (N•mn	离强度 / n) /mm	靠袋面试 验件编号	滚筒剥离强度 / (N•mm) /mm	
	固化压力 0.2MPa	固化压力 0.3MPa		固化压力 0.2MPa	固化压力 0.3MPa
1	14.95	16.42	5	13.71	14.37
2	14.64	14.72	6	13.64	14.31
3	14.74	15.22	7	13.55	14.97
4	14.89	15.12	8	13.59	15.07
平均值	14.8	15.4	平均值	13.6	14.7

在力学性能测试前、后的试验件分别如图 6、图 7 所示。 对比图 6、图 7 可以看出:在加载测试时,平面拉伸、剪切及 滚筒剥离强度试样的破坏均发生在胶接区下面的芯材部位, 而不是胶膜处,且面板没有折断现象,证明胶膜胶接强度大 于 PMI 泡沫芯材本身的强度。测试结果满足平面拉伸强 度、剪切强度及滚筒剥离强度性能要求。这主要是因为在固 化过程中,胶膜具有良好的流动性和较小的表面张力,对泡 沫芯表面产生润湿作用,填充了泡沫芯材表面凹凸不平的微 观孔隙,经高温高压固化后即嵌定在泡沫芯中,与泡沫芯紧 密结合起来,增强了胶接区域泡沫芯的强度。

对比表 4、表 5 和表 6 可得出,两种固化压力下,试验件 的弯曲强度、平面拉伸强度、剪切强度相当,说明 0.2MPa 及 0.3MPa 固化压力均可满足碳纤维泡沫夹层制件的强度性能 要求。在工程上制定泡沫夹层件固化参数时,需综合考虑泡 沫芯层的收缩率及胶接性能的影响,根据制件的实际情况选 择合适的固化压力。若泡沫芯层厚度小于 50mm,建议选择 0.2MPa 固化压力,满足胶接强度性能的同时可保证制件的 外形精度。若泡沫芯层厚度超过 75mm,可根据制件结构形 式选择 0.3MPa 固化压力。

滚筒剥离测试主要考察试验件胶接面的胶接强度。分析表7数据可知,采用0.3MPa进行固化的试验件,其滚筒剥离强度略高于0.2MPa,表明0.3MPa固化压力下,碳纤维



(c) 剪切强度

(d) 滚筒剥离强度

图 6 力学性能试验件 (测试前) Fig.6 Mechanical properties samples (before test)







(d) 滚筒剥离强度

图 7 力学性能试样验件 (测试后) Fig.7 Mechanical properties samples (after test)

面板与胶膜,胶膜与泡沫芯材的接触更充分,泡沫夹层试验 件的胶接强度更优。无论采用何种固化压力,试验件靠袋面 的滚筒剥离强度均高于靠模面,说明靠模面在受压条件下, 胶膜与碳纤维面板和泡沫芯材间的接触更充分,固化后胶接 强度更高。

3 结束语

通过 PMI 泡沫在加热加压状态下的收缩率试验及胶接 力学性能试验,可以得出如下结论:

(1)泡沫芯厚度越小,密度越低,吸湿量越大,固化压力 越大,则泡沫芯收缩率越高。

(2) 泡沫零件数控铣切前后,利用烘箱在130℃下干燥

处理 2h,去除水分,可降低泡沫芯的收缩率,提高其尺寸稳 定性,保证泡沫夹层复材制件的外形准确度。

(3) PMI泡沫芯长度及宽度方向的尺寸在加压前后变化 较小,而厚度方向收缩率较大。对于泡沫夹层复材制件,在泡 沫零件数控铣切时,厚度方向考虑按正差加工,必要时在厚度方 向带有 0.5%~1% 的补偿量,保证制件最终厚度尺寸满足要求。

(4) 0.3MPa 胶接的 PMI 泡沫夹层结构的滚筒剥离强度 略优于 0.2MPa 固化压力。剪切强度、平面拉伸强度及弯曲 强度无明显差别。靠袋面的胶接强度均高于靠模面。在工 程上制定泡沫夹层件固化参数时,需综合考虑泡沫芯材的收 缩率及胶接性能的影响,根据制件的实际情况选择合适的固 化压力。

参考文献

[1] 马瑛剑.聚甲基酰亚胺泡沫塑料[J].化学与黏合,2010,32
(4):44-47.

MA Yingjian. Polymethacrylimide foam [J].Chemistry and Adhesion, 2010, 32 (4): 44-47. (in Chinese)

[2] 赵悦霞. PMI 泡沫塑料在国内外的研究与应用简介 [J]. 宇航 材料工艺, 2010, 2: 13-16.

ZHAO Yuexia. The latest progress in PMI foam cored sandwich structure application[J]. Aerospace Materials & Technology,

2010, 2: 13-16. (in Chinese)

- [3] 胡培,陈秀华. PMI 泡沫夹层结构在 A380 后压力框上的应用 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41 (1): 51-53.
 HU Pei, CHEN Xiuhua. Application of PMI sandwich structure on A380 pressure bulkhead[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41 (1): 51-53. (in Chinese)
- [4] 董安琪. 湿热环境对 PMI 泡沫夹芯复合材料性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2012, 29 (2): 46-52.
 DONG Anqi. Effects of hydrothermal condition on properties of polymethacrylimide (PMI) foam cored sandwich structure[J]. Acta Material Composite Since, 2012, 29 (2): 46-52. (in Chinese)
- [5] Li X M, Weitman Y J. 海水对泡沫夹层复合材料板的影响 [J]. 复合材料 B 卷, 2004, 35: 451.
 Li X M, Weitman Y J. Sea-water effects on foam-cored composite sandwich layups[J]. Composite Part B, 2004, 35: 451. (in Chinese)

作者简介

成艳娜(1984-) 女,硕士,工程师。主要研究方向:树脂 基复合材料制造。 Tel:029-86883587 E-mail:284694452@qq.com

Study on Shrinkage Ratio and Bonding Property of PMI Foam

CHENG Yanna^{1,*}, LIU Xiangyang¹, WANG Yonghong² 1. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China 2. Air Force Representative Office, Xi'an 710089, China

Abstract: With the propose of further understanding the shrinkage properties of PMI foam, the relationship between shrinkage properties and parameters of PMI foam density, thickness, humidity, dry treatment, cured pressure were studied. The effects of manufacturing pressure on bonding property of PMI foam also were investigated via testing the bonding quality of PMI foams/carbon fiber sandwich standard samples which were manufactured under the pressure of 0.2MPa and 0.3MPa respectively. The research results indicates that the shrinkage ration is higher when the density, thickness and pressure of manufacturing of the PMI foam are higher. The shrinkage ration can decrease by treatment in 130 °C for 2h. Climbing drum peel strength of sandwich sample manufactured under 0.3MPa is higher than under 0.2MPa. There is no significant difference in shear strength, plane tensile strength and flexural strength testing.

Key Words: PMI foam; shrinkage ratio; bonding property; dry treatment; cured pressure

Received: 2016-12-19; Revised: 2017-01-10; Accepted: 2017-02-10

*Corresponding author. Tel. :029-86883587 E-mail: 284694452@qq.com