

泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺以及参数的选定

胡培，陈志东

德固赛（中国）投资有限公司上海分公司

薛元德，孙春方

同济大学航空航天与力学学院

文摘：

作者在介绍复合材料夹层结构的基础上，讲述了常用的芯材，包括铝蜂窝、NOMEX®蜂窝和 PMI 泡沫材料的性能和特点。然后介绍了刚性泡沫夹层结构三种常用的成型工艺：模压工艺，真空袋压/热压罐工艺和树脂注射工艺。在传统热固性预浸料模压工艺的基础上，详细的介绍了刚性泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺以及相关参数的选定。

关键词：共固化，模压，成型工艺，泡沫，芯材，夹层结构，复合材料

夹层结构的原理

在航空、运动器材、医疗等领域构件中，为了保证性能，降低重量，常常使用夹层结构。夹层结构的性能主要取决于面板的性能和面板之间的间距，面板的间距越大，几何惯性距越大，进而弯曲刚度就越大。夹层结构的芯材承受的应力相对较小，因此选择轻质材料作为芯材，可以减轻构件的重量，如图 1 所示。

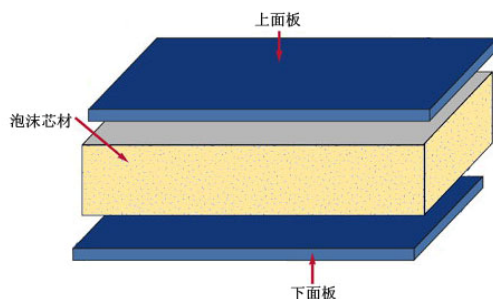


图 1 相同面板材料夹层结构

对于面材很薄的夹层结构，考虑到载荷的施加方式和夹层结构对冲击载荷的承载力，面板的最小厚度必须满足一定条件。夹层结构的使用经验还表明，在从经济方面评估夹层结构时候，结构的整个使用寿命也是一个重要因素。对于面板，主要考虑的是材料的强度和刚度，但是对于芯材，主要目的是为了最大幅度的减轻重量。在面板之间保持一定的距离的同时，为了维持面板的稳定，夹芯材料需要承受一定的压力。这样，夹芯材料主要承受压力和剪应力。



1



2



3

图 2 铝蜂窝（1）、PMI 泡沫（2）和 NOMEX®蜂窝（3）

常用的夹心材料如图 2 所示，有铝蜂窝、泡沫和 NOMEX®蜂窝。铝蜂窝或 NOMEX®蜂窝，具有压缩模量高，重量轻的优点。蜂窝夹心结构性能上的优异性，与预浸料复合材料面板在航空领域得到了广泛的应用，但是航空公司还是在积极寻找其代替材料，原因在于蜂窝夹芯材料在不同用

途的使用过程中需要高昂的维修费用。在一些特殊的情况下，蜂窝会进水，例如，如果面板出现裂缝、孔隙。低温时，蜂窝孔隙中的水冰冻以后，发生膨胀，会破坏邻近的蜂窝孔隙的粘结。因此蜂窝芯材构件的维护需要经常的检查。这些蜂窝夹层构件的维护费用使得原本轻质的优点和泡沫夹层结构相比，不再具有优势，尽管泡沫的重量相对要重一些。但泡沫夹心构件在构件的整个使用年限内，更加经济。表 1 对各种芯材做了简单介绍。

芯材及密度大约 70 kg/m ³	压缩模量	剪切强度
铝蜂窝(72 kg/m ³)	1034 MPa	2.3 (L), 1.5 (W) MPa
NOMEX 蜂窝 80 kg/m ³	250 MPa	2.25 (L), 1,2 (W) MPa
PMI ROHACELL [®] 泡沫 71WF 75 kg/m ³	105 MPa	1.3 MPa

表 1、铝蜂窝、NOMEX[®]蜂窝、泡沫的性能比较

铝蜂窝：在重量一定的前提下，由于铝蜂窝材料的壁可以做得很薄，这样可以得到很高的压缩模量。但是，薄壁也会导致蜂窝的表面，尤其在蜂窝孔隙较大的情况下，发生局部的稳定破坏。另外，铝蜂窝和碳纤维一同使用时，为避免发生电腐蚀，两种材料之间必须做电绝缘处理。金属蜂窝的显著优势是，它能满足严格的空间材料的气体释放要求。

NOMEX[®]蜂窝: NOMEX[®]蜂窝是采用芳纶纸浸酚醛树脂制成，具有广泛的应用领域。NOMEX[®]蜂窝和铝蜂窝相比，局部屈服的问题要小得多，因为 NOMEX[®]蜂窝的蜂窝壁可以做得相对要厚一些。另外，因为 NOMEX[®]材料不导电，不存在接触电腐蚀的问题。但是由于芳纶产品不能抵抗紫外线，NOMEX[®]蜂窝需要有面板保护。材料浸酚醛树脂而制成，也能满足 FST 要求。

PMI 泡沫: PMI (Polymethacrylimide，聚甲基丙烯酰亚胺)泡沫在进行适当的高温处理后，也能承受 180°C 的复合材料固化工艺要求，这样使得 PMI 泡沫在航空领域得到了广泛的应用。中等密度的 PMI 泡沫具有很好的压缩蠕变性能，可以在 180°C，0.5MPa 的压力下，压力罐固化。PMI 泡沫能满足通常的预浸料固化工艺的蠕变性能要求。作为航空材料的 PMI 泡沫是一种均匀的闭孔泡沫，孔隙大小基本一致。图 3 中表示出了不同聚合物刚性泡沫的动态剪切模量。

不同刚性泡沫的动态剪切模量

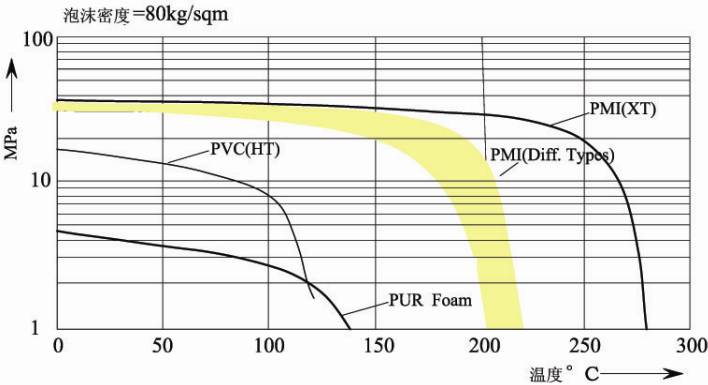


图 3 不同刚性泡沫的动态剪切模量的对比

刚性泡沫夹层结构的成型工艺介绍

刚性泡沫夹层结构目前常用的固化工艺，主要可以看成两大类，一类是胶接分步实施的多次固化工艺，另一类是复合材料面板的固化和面板与芯材之间的胶接同时完成。为了降低复合材料的工

艺成本，共固化工艺是目前夹层结构制造的发展趋势。当然，不管是采用共固化工艺还是采用多次固化工艺，都必须考虑工艺方法对芯材的要求。

通常，可以采用手糊成型，模压工艺，真空袋压/热压罐工艺或树脂注射工艺等方法制造环氧树脂复合材料泡沫夹心结构。如果选用热压罐工艺和树脂注射工艺的固化过程，泡沫芯材在一段时间内，受到温度和压力的同时作用。这要求泡沫能够具有很好的耐压缩蠕变性能，否则不能保证固化前、后构件的尺寸稳定性。

模压成形工艺是玻纤/碳纤复合材料成形工艺中发展较早、也较成熟的一种成形工艺，它是根据产品的要求，将若干层浸预浸料层叠起来，置于两个抛光的金属模板之间，再送入热压机内。在一定的温度和压力下对两层模板之间加热、固化，然后冷却、脱模压制成材的工艺方法。层合工艺具有机械化、自动化程度高、制品质量较高，性能稳定等特点，适合于批量生产。

十九世纪九十年代，Westland 直升机公司（现更名 Agusta Westland）在针对新一代先进直升机旋翼的发展项目—英国试验旋翼项目(British Experimental Rotor Program, 简称 BERP 1)中引进了 PMI 泡沫。1989 年山猫直升机 Lynx AH MK 9 的首次飞行即安装了新型先进复合材料旋翼，旋翼直径达到 12.8m。PMI 泡沫的热弹性性能和良好的耐热蠕变性能使 WESTLAND 公司和德固赛公司合作开发了“夹层结构模压共固化成型工艺”。PMI 泡沫既作为“主动”芯模，也作为构件的一个结构材料，参见图 4。泡沫芯材略大于模腔尺寸，有一定的过盈量，合模以后，提供足够且稳定的内压力，预浸料铺层即使在很厚的情况下，也能够完全固化，降低层板的孔隙率。采用这个工艺方法来生产直升机桨叶的优点是尺寸精确，工艺简单，可靠性高。

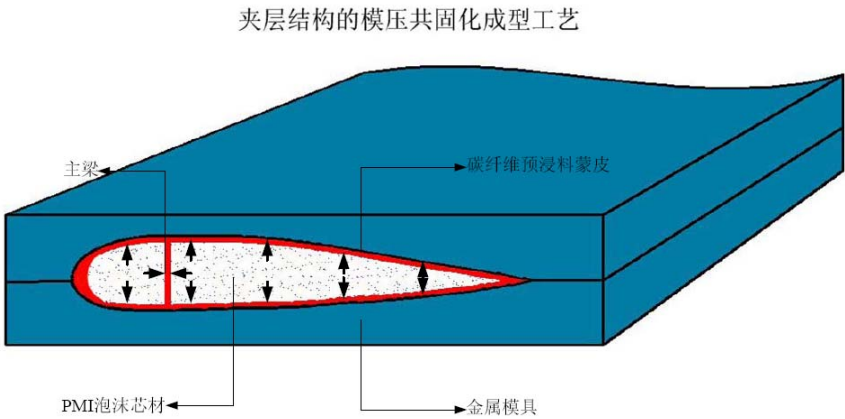


图 4 夹层结构模压共固化成型工艺

夹层结构模压共固化成型工艺，是在传统的热固性树脂模压工艺的基础上，发展出来的一个新的工艺方法。工艺参数的确定，除了传统模压工艺的加温曲线以外，还要在 PMI 泡沫的热弹性性能的基础上，确定泡沫的过盈量的大小，保证在合模温度下，泡沫能够给预浸料提供合适的固化压力。这可以通过模拟试验得出。

夹层结构模压共固化成型工艺参数的确定

以制造采用夹层结构的复合材料桨叶为例，模压共固化成型工艺主要分为下面三个步骤。

芯材的机械加工成型→铺层，预装配→固化成型

模压工艺的关键因素是温度、压力和时间这三个工艺参数。在整个热压过程中，预浸料中的树脂逐步固化。因此，在选定工艺参数时应首先从树脂的特性来考虑。

1, 温度 温度规范的确定主要取决于预浸料中所含树脂的固化特性以及预浸料的含胶量, 挥发份和不溶性树脂含量等质量指标。除此之外, 还必须考虑传热速率问题, 这一点对于厚板尤为重要。一般热压工艺的升温曲线可分为五个阶段, 如图 5 所示, 有如下形式。

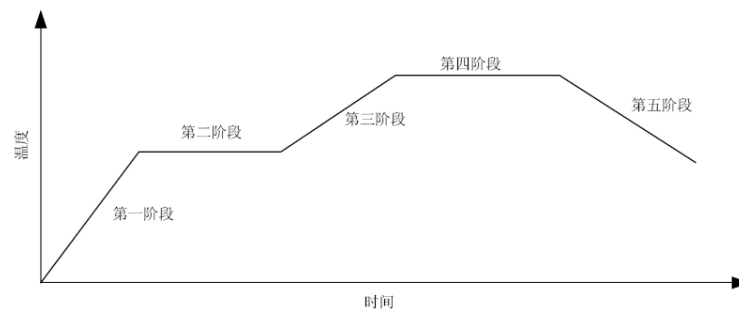


图 5 热压工艺升温曲线

第一阶段：预热阶段。一般取从室温到开始显著反应的温度，这一段称为预热阶段。预热阶段的目的是使预浸料中的树脂熔化，去除部分挥发份，使融化的树脂进一步浸渍玻纤或碳纤维，并使树脂逐步固化交联到凝胶状态。此时压力一般为 $1/3-1/2$ 全压。

第二阶段：中间保温阶段。这一阶段的作用是使预浸料在较低的反应速度下进行固化，防止反应速度过快，在短期内生成大量的挥发份，从而严重降低制品的质量。另外也缩小了电热板间的各个部位的预浸料温度差，使层合板的质量较为均匀。保温温度一般选在树脂开始反应的温度或略高一些的温度范围较为合适。

第三阶段：升温阶段。这一阶段的作用在于逐步提高反应温度，以加快固化反应速度。一般来说升温速度不宜过快，因为加热过快，则引起树脂反应激烈，放热集中，在玻纤或碳纤维复合材料中容易产生缺陷，如裂缝、分层等。

第四阶段：热压保温阶段

这一阶段的作用在于使树脂获得充分的固化。所选择的温度主要取决于树脂的固化特性、时间和层合板材的厚度。

第五阶段：冷却阶段。

在保压的情况下，采用自然冷却或强制冷却到室温，而后去除压力取出制品。

2, 压力

成形压力的作用一般如下：第一，主要用来克服挥发份产生的蒸汽压力。在热压过程中要产生一定量的挥发份，这些挥发份如果没有较大的成形压力约束，就会在玻纤/碳纤维复合材料中形成大量的气泡和微孔，从而降低玻纤/碳纤维复合材料质量。第二，使粘稠的树脂有一定的流动性。第三，使预浸料层间粘接紧密，并使玻纤/碳纤维布受到一定的压缩。第四，防止层合板材在冷却过程中变形。通常环氧板材为 $3.9\sim 5.9\text{MPa}$ 。

传统的模压工艺，成型压力由压机直接控制，但夹层结构共固化模压工艺，压力通过泡沫的过盈量来控制。过盈量是指泡沫芯材大于设计最终尺寸的比率。结合工艺特点，过盈量一般只有在高度的方向，但在加压的过程中，其它的两个方向也会产生压力。

为了选择合适的过盈量，通过对不同类型密度的 PMI 泡沫在不同过盈量在固化时间、升温曲线下的反压力进行了试验和探索。

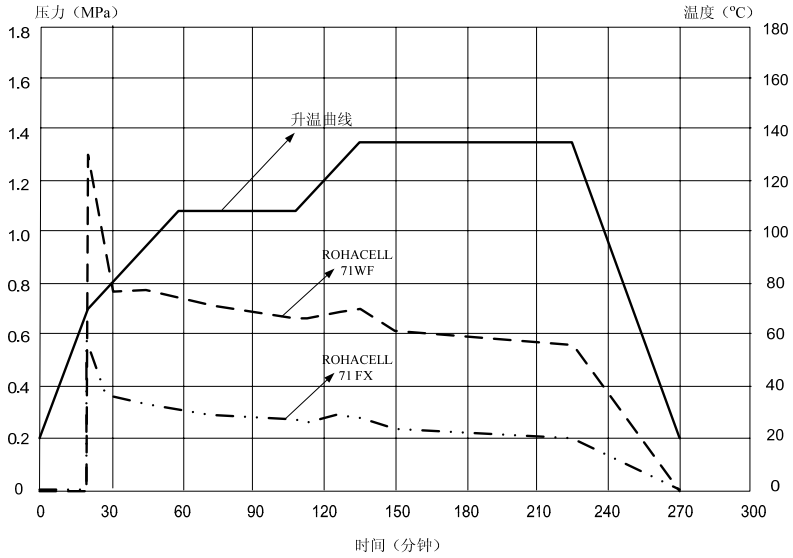


图 6 ROHACELL 71WF 和 71FX 的反压力曲线

图 6 中样件是 80 毫米直径的 ROHACELL® 71WF 和 71FX 圆柱体泡沫试件，试件高度是 25 毫米 × (1+5%的过盈量)，即 26.25mm。合模上下面板之间的间距为 25 毫米。压力记录点位于圆柱体的上表面的中心位置。在试验过程中，泡沫和模具温度上升到 60°C 左右完全合模。可以看出，ROHACELL® 71WF 的反压力比 71FX 要高很多。

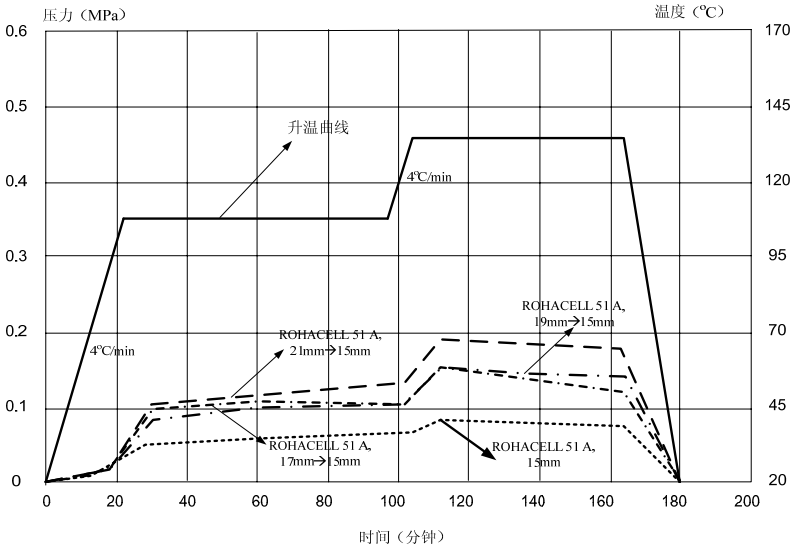


图 7 ROHACELL® 51 A 的反压力曲线

图 7 中是直径 79.8 毫米的 ROHACELL® 51 A 圆柱体泡沫试件，初始高度分别是 21mm，19mm，17mm 和 15mm，在从室温开始加压至 15 毫米。可以看出反压力的大小随过盈量的增加而增加。因为是在室温情况下加压，泡沫的孔隙结构发生了破坏，在升温过程中，和图 6 相比，产生的反压力相对较小。

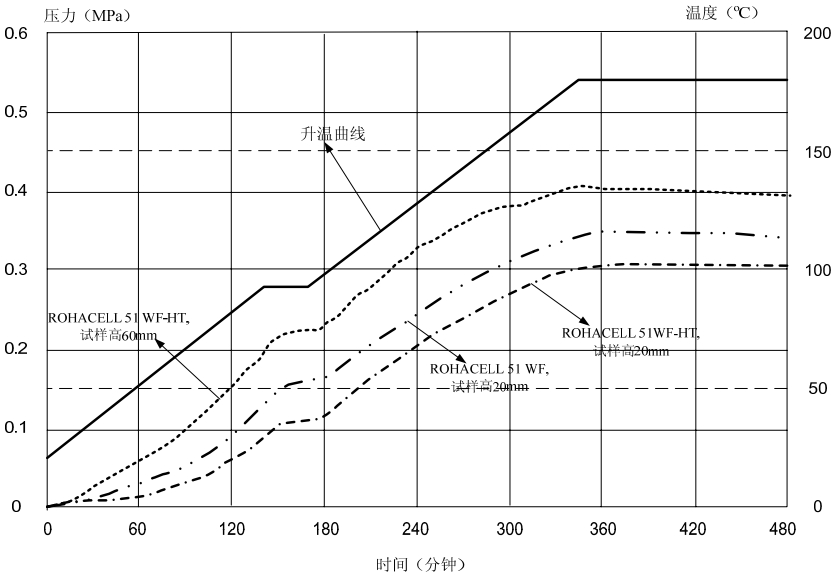


图 8 ROHACELL® 51 WF 和 51 WF-HT 的反压力性能

图 8，这里的样件是 80 毫米直径的 ROHACELL® 51 WF 圆柱体泡沫，高度 20 毫米或 60 毫米。在没有过盈量的情况下，由于温度升高产生的反压力。显然 ROHACELL® 51 WF-HT 泡沫，即经过热处理的 51WF 泡沫，其反压力和 ROHACELL® 51 WF 相比有所降低。另外，反压力的大小随试样高度的增加而增加。

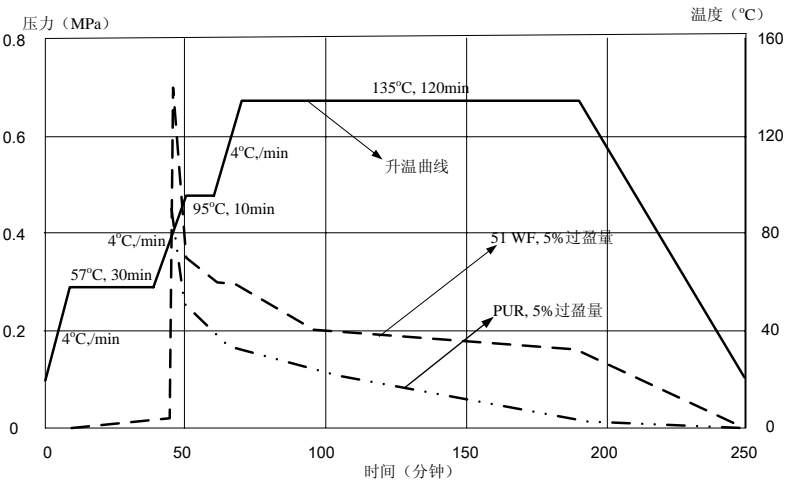


图 9 ROHACELL 和 PUR 泡沫的性能对比

图 9 是在相同过盈量的情况下，ROHACELL® 51 WF 泡沫和 PUR 泡沫之间的对比，试样厚度为 25.4mm×（1+5%的过盈量）。可以发现，和 PMI 泡沫相比，硬质 PUR 泡沫不能给预浸料提供稳定、合适的反压力。

结论

综上,为了在泡沫夹层结构共固化模压工艺中得到稳定的反压力,可以在高度方向取合适的过盈量,如 5%。对泡沫芯高度较小的情况,最少为 1 毫米。因为良好的压缩蠕变性能,PMI 泡沫芯材可以提供很高的且持久的压力值。试验显示,在固化周期中模内压力最高可达 7 bar。根据固化工艺的要求,可以对峰值压力调整,满足环氧树脂预浸料的固化条件。

泡沫材料的良好力学性能也能提高常常在旋翼中设计很薄的 D 形梁的失稳强度。由 BELL 公司开展的一项研究显示 PMI 泡沫芯材嵌入转子叶片化费的成本仅占蜂窝芯制造方案的 20%。这是因为泡沫芯材使它可能采用一次性固化成型工艺,而蜂窝芯材则需要分几次固化和粘接操作。和其它任何其它刚性泡沫相比,PMI 泡沫超乎寻常的抗疲劳性能,使其可以承受在使用过程中旋翼产生的高动力载荷。使用 PMI 泡沫芯材的设计,使得直升机旋翼的使用寿命得到一个量上的飞跃。

目前,夹层结构模压共固化工艺已经从航天航空领域,成功推广到医疗床板、运动器材等多个领域,为刚性泡沫夹层结构的应用开拓了广阔的应用前景。

参考文献:

1. 先进复合材料手册,赵渠森,郭恩明,机械工业出版社
2. 高速列车用 PMI 泡沫力学性能研究,孙春方 李文晓 薛元德 胡培,玻璃钢/复合材料-2006(4)-13-15
3. 复合材料泡沫夹层结构力学性能与试验方法,孙春方 薛元德 胡培,玻璃钢/复合材料-2005(2)-3-6
4. 复合材料泡沫夹层结构在民机中的应用窦润龙 胡培 民用飞机设计与研究-2004(3)-42-45
5. 船用玻璃钢 / 复合材料夹层结构中的泡沫芯材 曹明法 胡培,江苏船舶-2004:21(2)-3-6
6. RTM 工艺中的泡沫芯材,胡培,玻璃钢-2003(3)-15-21
7. 夹芯结构中的聚合物泡沫材料和蜂窝的比较,AltadtV.DiedrichesF. 胡培 等,玻璃钢-2002(2)-12-21