

泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺及参数选定

胡培 陈志东

薛元德 孙春方

[德国赛(中国)投资有限公司上海分公司,上海 201108] (同济大学航空航天与力学学院,上海 200092)

摘要 在分析夹层结构的基础上,概述了常用芯材包括铝蜂窝、NOMEX³蜂窝和聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料的性能和特点,介绍了刚性泡沫夹层结构常用的成型工艺,详细阐述了刚性泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺及相关参数的选定。

关键词 泡沫塑料 夹层结构 模压 共固化 成型工艺 芯材

在航空、运动器材、医疗等领域的构件中,为了保证性能、降低件重,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^[1]。夹层结构的面板一般为玻纤/碳纤维复合材料;芯材承受的应力相对较小,因此可选择轻质材料以减轻构件的质量。图1为夹层结构示意图。

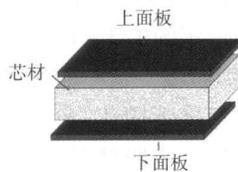


图1 夹层结构示意图

对于面板,主要考虑的是材料的强度和刚度,但是对于芯材,主要目的是最大程度地减轻质量,在上、下面板之间保持一定距离的同时,需要承受一定的压力,以维持面板的稳定^[2]。

常用的芯材有铝蜂窝、泡沫塑料和 NOMEX³蜂窝^[3]。对于铝蜂窝,在质量一定的前提下其壁可以做得很薄,这样可以得到很高的压缩弹性模量。但是,薄壁也会导致蜂窝表面尤其蜂窝孔隙较大的表面发生局部破坏。另外,将铝蜂窝和碳纤维一同使用时,为避免发生电腐蚀,两种材料之间必须进行电绝缘处理。金属蜂窝的显著优势是能满足严格的空材料的气体释放要求。NOMEX³蜂窝是采用芳纶纸浸酚醛树脂制成的,具有广泛的应用领域。NOMEX³蜂窝与铝蜂窝相比,局部屈服的问题要小得多,因为 NOMEX³蜂窝的壁可以做得相对厚一些。另外, NOMEX³蜂窝材料不导电,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, NOMEX³蜂窝需要有面板保护。由于材料是浸酚醛树脂制成,所以也能满足烟雾毒性(FST)要求。聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫塑料在进行适当的高温处理后,也能承受180℃的固化工艺要求,这样使得

PMI泡沫塑料在航空领域得到了广泛的应用。中等密度的 PMI泡沫塑料具有很好的压缩蠕变性能,可以在180℃、0.5 MPa下进行热压罐固化。PMI泡沫塑料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泡沫塑料是一种均匀的闭孔泡沫材料,其孔隙大小基本一致。表1示出铝蜂窝、NOMEX³蜂窝和 ROHACELL⁵ 7 IWF PMI泡沫塑料芯材的性能对比^[4]。

表1 3种芯材的性能对比

材料	密度 / kg·m ⁻³	压缩弹性 模量 /MPa	剪切强度 ¹⁾ /MPa
铝蜂窝	72	1034	2.3 (L), 1.5 (W)
NOMEX ³ 蜂窝	80	250	2.25 (L), 1.2 (W)
ROHACELL ⁵ 7 IWF	75	105	1.3

注: 1) L代表长度方向; 2) W代表宽度方向。

1 刚性泡沫夹层结构的成型工艺介绍^[5]

刚性泡沫夹层结构目前常用的固化工艺主要有两大类,一类是胶接分步实施的多次固化工艺,另一类是玻纤/碳纤维复合材料面板固化和面板与芯材胶接同时完成的共固化工艺。为了降低工艺成本,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。

通常可采用手糊成型、模压成型、真空袋压/热压罐成型或树脂注射成型等方法制造泡沫夹层结构。如果选用热压罐成型或树脂注射成型,固化过程中泡沫芯材在一段时间内要受到温度和压力的同时作用,这要求泡沫芯材具有很好的压缩蠕变性能,否则不能保证固化前、后构件的尺寸稳定性。

模压成型是发展较早也较成熟的一种成型工艺。它是根据产品的要求,将若干层预浸料层叠起来,置于两个抛光的金属模板之间,再送入热压机

收稿日期: 2007-06-07

内,在一定的温度和压力下进行固化,然后冷却、脱模压制成材。模压成型工艺具有自动化程度高、制品质量较高、性能稳定等特点,适合于批量生产。

20世纪90年代,Westland直升机公司在新一代先进直升机旋翼的发展项目(英国试验旋翼项目)中引进了PMI泡沫塑料。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泡沫塑料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泡沫塑料既作为“主动”芯模,也作为构件的一个结构材料,其结构见图2。泡沫芯材尺寸略大于模腔尺寸,有一定的过盈量,合模后能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。

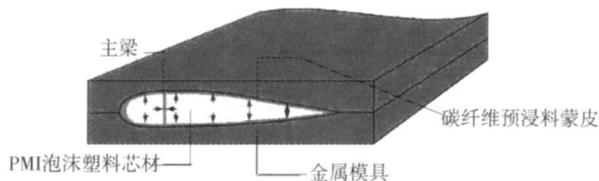


图2 夹层结构模压共固化成型结构

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起来的一个新的工艺方法。其要确定的参数除了传统模压工艺的升温曲线外,还包括泡沫塑料过盈量的大小,以提供合适的固化压力,这可以通过模拟试验得出。

2 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3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^[6]。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。实验选用4种牌号的ROHACELL⁵ PMI泡沫塑料,其物理力学性能见表2。

2.1 温度

成型温度主要取决于预浸料中所含树脂的固化特性、预浸料的含胶量、挥发分和不溶性树脂含量等指标。除此之外,还必须考虑传热速率,这一点对于厚板尤为重要。

表2 ROHACELL⁵ PMI泡沫塑料的基本物理力学性能

项目	51A	71FX	51WF	71WF
密度 /kg·m ⁻³	52	75	52	75
压缩强度 /MPa	0.9	0.8	0.8	1.7
压缩弹性模量 /MPa	70	65	75	105
剪切弹性模量 /MPa	19	26	24	42
断裂伸长率 /%	4	9	3	3
热变形温度 /°C	180	180	205	200

一般热压工艺的升温曲线可分为5个阶段,如图3所示。



图3 热压工艺升温曲线

(1)预热阶段 一般为从室温到开始显著反应的温度。预热阶段的目的是使预浸料中的树脂熔化,去除部分挥发分,使熔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。此时压力一般为全压的1/3~1/2。

(2)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固化,防止因反应速度过快生成大量挥发分而严重降低制品的质量,另外这一阶段的作用也缩小了电热板间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。

(3)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,否则引起树脂反应激烈,放热集中,在玻纤/碳纤维复合材料中容易产生裂缝、分层等缺陷。

(4)热压保温阶段 这一阶段的作用在于使树脂充分固化。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。

(5)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。

2.2 压力

成型压力的作用为: 主要克服挥发分产生的蒸汽压力。在热压过程中要产生一定量的挥发分,这些挥发分如果没有较大的成型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/碳纤维复合材料的质量。使粘稠的树脂有一定的流动性。使预浸料层间粘接紧密,并使玻纤/碳纤维受到一定的压缩。防止层合板材在冷却过程中变形。通常环氧树脂板材的成型压力为3.9~5.9MPa。

传统模压工艺的成型压力由压机直接控制,但对于夹层结构共固化模压工艺,压力通过泡沫塑料的过盈量来控制。过盈量是指泡沫塑料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,但在加压过程中其它两个方向也会产生压力^[7]。为了选择合适的过盈量,对不同类型的 PM I 泡沫塑料在不同固化时间、升温曲线下的反压力进行了试验和探索。

图 4 为直径 80 mm 的 ROHACELL⁵ 71WF 和 71FX 圆柱体泡沫塑料试件的反压力曲线。合模上下面板之间的间距为 25 mm。取 5% 的过盈量,试件初始高度为 26.25 mm。压力记录点位于圆柱体上表面的中心位置。在试验过程中,泡沫塑料和模具温度上升到 60℃ 左右完全合模。由图 4 可以看出,ROHACELL⁵ 71WF 的反压力比 71FX 要高很多。

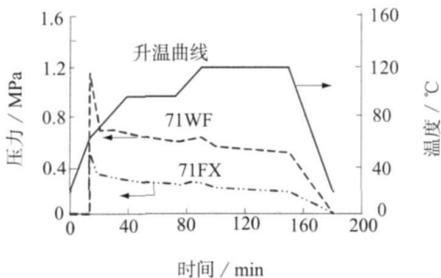


图 4 ROHACELL⁵ 71WF 和 71FX 的反压力曲线

图 5 是直径 79.8 mm 的 ROHACELL⁵ 51A 圆柱体泡沫塑料试件的反压力曲线。试件初始高度分别是 21、19、17、15 mm, 在从室温开始加压至 15 mm。由图 5 可以看出,反压力的大小随过盈量的增加而增加。由于是在室温下加压,泡沫塑料的孔隙结构发生了破坏,和图 4 相比,在升温过程中,产生的反压力相对较小。

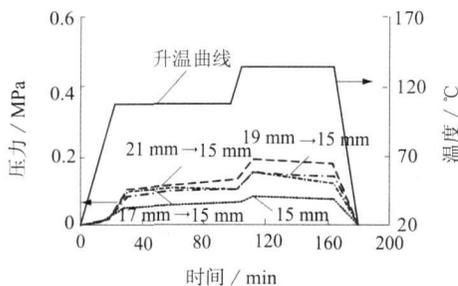


图 5 ROHACELL⁵ 51A 的反压力曲线

图 6 是直径 80 mm 的 ROHACELL⁵ 51WF 和 51WF-HT (经 130℃/2 h + 190℃/48 h 热处理的 51WF) 圆柱体泡沫塑料 (高度 20 mm 或 60 mm) 的反压力曲线。在没有过盈量的情况下,由于温度升

高而产生反压力。显然 ROHACELL⁵ 51WF-HT 泡沫塑料的反压力有所降低。另外,反压力的大小随试样高度的增加而增加。

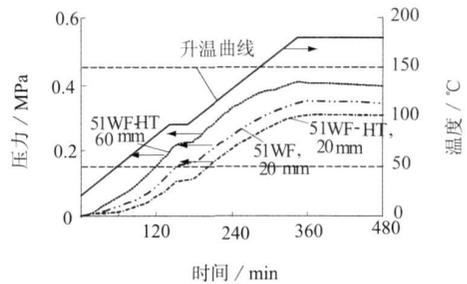


图 6 ROHACELL⁵ 51WF 和 51WF-HT 的反压力曲线

图 7 是在 5% 过盈量的情况下,ROHACELL⁵ 51WF 泡沫塑料和 PUR 泡沫塑料之间的对比,试样初始高度为 25.4 mm × (1 + 5%)。由图 7 可以发现,和 PM I 泡沫塑料相比,PUR 泡沫塑料不能给预浸料提供稳定、合适的反压力。

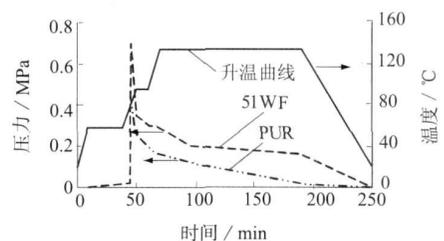


图 7 ROHACELL⁵ 和 PUR 泡沫塑料的性能对比

3 结语

为了在泡沫塑料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%,对泡沫芯材高度较小的情况最少为 1 mm。PM I 泡沫塑料由于具有良好的压缩蠕变性能,其作芯材可以提供很高且持久的压力值。试验显示,在固化周期中模内压力最高可达 0.7 MPa。泡沫塑料良好的力学性能也能提高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,PM I 泡沫塑料芯材嵌入转子叶片的成本仅占蜂窝芯制造方案的 20%。这是因为泡沫塑料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。和其它刚性泡沫塑料相比,PM I 泡沫塑料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 PM I 泡沫塑料芯材的设计使得直升机旋翼的使用寿命得到一个量的飞跃。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,为刚性泡沫塑料夹层结构的应

用开拓了广阔的应用前景。

参 考 文 献

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

PRESSMOLDING CO-CURING PROCESSING METHOD AND SPECIFICATION DETERMINATION OF FOAM-CORED SANDWICH STRUCTURE

Hu Pej Chen Zhidong

[Degussa (China) Co Ltd, Shanghai Branch Shanghai 201108 China]

Xue Yuande Sun Chunfang

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT With the introduction of composite sandwich structure, the paper presents the properties of the common core materials including aluminum honeycomb, NOMEX honeycomb and foam. Three usual processing methods of the rigid foam cored sandwich structure, which are press molding, vacuum bagging/autoclaving and resin infusion, are also discussed. Based on the traditional thermoset resin prepreg press molding technology, the press molding co-curing processing method and specification determination of rigid foam cored sandwich structure are described in details.

KEYWORDS foam, sandwich structure, press molding, co-curing, processing method, core material

《工程塑料应用》杂志开设“技术转让与合作”、“企业风采”栏目

为做好广大作者、读者单位最新科研成果及新产品、新技术的推广服务,《工程塑料应用》杂志和“工程塑料网”(www.epa1973.com)网站已开设“技术转让与合作”栏目,以方便买卖双方的有效交流与沟通。栏目内容可涉及科研成果及专利技术的转让,公司新产品、新技术简介等方面。

另外,为了全方位宣传塑料行业精英企事业单位形象,《工程塑料应用》杂志增设“企业风采”栏目。报道内容主要是企业发展历史、企业文化、企业管理、研发创新能力、新产品发布、攻关项目介绍,人物专访等。来稿字数控制在5000字以内,可以附带图片。

《工程塑料应用》为中文核心期刊,是中国工程塑料工业协会会刊,国内外公开发行,屡获国家期刊奖,是中国塑料行业的权威媒体,知名度高,发行量大。可确保您发布的信息有足够的浏览量。

欢迎各有关企事业单位踊跃投稿!投稿时请提供所发布信息真实性证明,并加盖单位公章。具体刊登事宜请与编辑部直接联系。

地址:山东省济南市108信箱杂志社 邮编:250031

电话:0531-85878057 85878278 传真:0531-85947355 85878224 E-mail epa@epa1973.com

欢迎订阅 2006年《工程塑料应用》增刊(总第205期)

由中国机械工程学会、中国机械工程学会特种加工分会、全国快速成形技术学术委员会等单位主办,华南理工大学等单位承办的“第四届全国快速成形与快速制造学术会议”于2006年11月在华南理工大学召开。应华南理工大学等承办单位的委托,《工程塑料应用》杂志社以2006年增刊形式编辑、出版了本次会议的论文专辑。该期刊物编入连续期刊号(总第205期),已于11月20日出版。该增刊共收录39篇优选会议论文,内容涉及快速成形新工艺、新设备,快

速成形软件与数据处理技术等,定价为20元/册。欢迎读者通过邮局或银行汇款订阅。

邮局汇款:

收款单位:山东省济南市108信箱杂志社 邮编:250031

银行汇款:

户名:中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

帐号:1602001229014425546