

# 树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构成型技术研究进展

颜鸿斌 孙红卫 凌英 蒋文革 付求舟

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 总结归纳了树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构的五种典型成型工艺方法,并对其部分成型工艺的特点、优缺点等进行了较为详细的阐述。

**关键词** 树脂基复合材料,泡沫塑料,夹层结构,成型技术

## Progress of Moulding Technology of Resin-matrix Composite/foam Plastic Sandwich

Yan Hongbin Sun Hongwei Ling Ying Jiang Wenge Fu Qiuzhou

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** This paper summarizes five typical moulding technologies of resin-matrix composite/foam plastic sandwich. The characteristics of some technologies are also introduced in detail.

**Key words** Resin-matrix composite, Foam plastic, Sandwich, Moulding technology

### 1 前言

树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构是一种采用树脂基复合材料作为蒙皮、采用泡沫塑料作为夹芯的夹层结构形式,在民用和国防工业领域均得到了广泛应用。尤其在需要夹层结构件满足水密和具备抗结构破坏漂浮等特殊性能的使用要求的时候,如舰载发射伞降海面回收无人驾驶飞机、轻型飞机、

大型船舶等,一般采用树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构。树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构的制备工艺方法多样,按预成型先后大致可以分三类:预成型泡沫芯法、预成型蒙皮法以及预成型泡沫芯和蒙皮法。具体成型工艺方法又可以归纳为五种,见表1。本文对树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构的制备工艺方法进行归纳、阐述。

表1 树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构的成型工艺方法分类

Tab.1 Processing methods for resin-matrix composite/foam plastic sandwich

| 按预成型分类     | 成型工艺种类   | 成型工艺说明            |                 |     | 泡沫闭孔率要求 |
|------------|----------|-------------------|-----------------|-----|---------|
|            |          | 泡沫                | 蒙皮              | 胶膜  |         |
| 预成型泡沫芯法    | 蒙皮预浸料铺层  | 预先发泡成型、加工         | 蒙皮固化与夹层结构成型同时进行 | 需要  | 较高      |
|            | 共固化成型工艺  |                   |                 | 不需要 |         |
|            | 拉挤成型工艺   |                   |                 | 不需要 |         |
|            | RTM成型工艺  |                   |                 | 不需要 |         |
| 预成型蒙皮法     | 灌注发泡成型工艺 | 泡沫发泡固化与夹层结构成型同时进行 | 蒙皮预先成型、加工       | 不需要 | 较低      |
| 预成型泡沫芯和蒙皮法 | 预制胶接成型工艺 | 泡沫和蒙皮均预先成型、加工     |                 | 需要  |         |

收稿日期:2003-05-27;修回日期:2003-09-09

颜鸿斌,1972年出生,工程师,主要从事复合材料的研究工作

## 2 制备工艺

### 2.1 预制胶接成型工艺

预制胶接成型工艺是预先成型好泡沫芯和树脂基复合材料蒙皮,进行加工修整后,再用胶膜将泡沫芯和蒙皮合模固化粘接成为夹层结构。其结构形式为蒙皮(已固化)/胶膜/泡沫芯/胶膜/蒙皮(已固化),然后胶膜在加热加压条件下固化成型(一般需在热压罐中进行)。

据文献[1]报道,北京航空材料研究院等单位在研制某新型航天器返回舱舱门共形天线(双层泡沫夹层结构)时,采用了对模胶接成型工艺制备所需的树脂基复合材料/泡沫夹层结构。其采用的蒙皮材料为 QW140 石英布/4501A 双马树脂复合材料,夹芯材料为 WF110 泡沫,蒙皮与夹芯材料用高强度膜状环氧结构胶粘剂——SY-14 胶膜胶接。该夹层结构的热导率  $0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,使用温度范围  $100 \sim 180$ 。

预制胶接成型工艺的优点是能适用各种泡沫塑料,工艺简单,一般适合产品质量要求不高的场合。其不足之处是如果采用该法制造复杂的夹层结构件或大型的夹层结构件,由于结构复杂或胶接面积大,胶接间隙难以准确控制,胶接质量难以保证。特别是对高性能的复杂气动外型的夹芯结构叶片,还往往需要粘接第二次加工,粘接工艺需要粘接平台或型架以确保粘接面的贴合,生产工艺更加复杂和困难。

### 2.2 蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺

蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺是预先成型好泡沫芯,进行加工修整后,再用胶膜(也可不用胶膜)将蒙皮预浸料铺层组铺放在泡沫芯上合模固化粘接成为夹层结构。即一般采用蒙皮预浸料铺层组/胶膜/泡沫芯/胶膜/蒙皮预浸料铺层组的结构形式,然后胶膜和蒙皮预浸料一起在加热加压条件下固化成型。

蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺由于一般需要在热压罐或压机中加热加压成型,因此要求泡沫芯材料具有耐温、耐蠕变压缩性;同时为了防止升温固化过程中,预浸料中大量的树脂进入泡沫芯,还要求泡沫芯具有非常高的闭孔率。该类泡沫有 PVC、PEI 和其它线性微孔闭孔型泡沫等,其中典型的高性能泡沫材料是德国 Röhme(德固塞)公司生产的聚丙烯

酰亚胺(PMI)泡沫,其商标为 ROHACELL<sup>®</sup>。

据文献[2,3]报道,美国 Delta II、Delta III 和 Delta IV 运载火箭的仪表舱整流罩和级间联接部分(波音公司制造)及日本 H II-A 运载火箭整流罩的级间联接部分(日本五十铃重工制造)等采用的最先进的碳/环氧(C/E)蒙皮/PMI(WF 级)泡沫夹层结构就是采用蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺来制造的。其中 Delta II 火箭的整流罩是由两个大约 9 m 长的 ROHACELL<sup>®</sup> 半球壳组成,ROHACELL<sup>®</sup> 半球壳和环氧预浸料面板共固化,其整流罩锥段及柱段、倒锥段整体成型,充分发挥了复合材料的优势,减重效果明显。最近 EUROCOPTER 在制造虎式直升机加筋发动机帽型梁时,也是采用蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺来制造碳/双马(C/BMI)蒙皮/PMI(XT 级)泡沫夹层结构。尽管该成型方法所制备的泡沫夹层结构的几何尺寸精度可以靠模具来保证,但是其蒙皮外表面外观质量一般较差。因此,对于对外表面质量要求严格的泡沫夹层结构件,如要求表面树脂层均匀透明的医用 X-射线全身 CT 扫描机床板(碳纤维环氧复合材料蒙皮/PMI 泡沫夹层结构)<sup>[4]</sup>而言,必需对蒙皮外表面贫胶区域进行一系列后处理工序修补,并需最终在蒙皮外表面喷涂对 X-射线影响较小的清漆。

### 2.3 灌注发泡成型工艺

灌注发泡成型工艺是预先成型树脂基复合材料蒙皮,进行加工修整后,再在装配已成型好的蒙皮和其它零部件的对合模具中灌注混合均匀的泡沫料浆,经过内部发泡固化,使泡沫塑料胀满腔体,并与壳体粘接成为一个整体结构,从而形成夹层结构。

我国某型号舰载发射伞降海面回收无人驾驶飞机机翼采用了树脂基复合材料/聚氨酯泡沫夹层结构,由于无人机机翼内部结构复杂,西北工业大学<sup>[5~8]</sup>在设计制造时采用的工艺方案就是采用灌注发泡成型工艺来制造结构复杂的全容腔填充泡沫塑料无人机机翼结构,制造的无人机机翼具有整体性好、翼型精度高、质量轻等优点。

此工艺在发泡时硬泡与蒙皮界面形成一层较密的皮层结构作为过渡层,这对提高界面强度是有利的。但是,这需要在成型过程中严格控制模具温度。若模具温度太高,则加快了发泡速度,界面疏松,界面强度降低;相反模具温度过低,其反应速度变慢,

发泡压力低,界面粘接也不好。因此,必须选择合适的模具温度才能有利于界面过渡层的形成,才能获得良好的界面粘接强度和泡沫质量<sup>[9]</sup>。

## 2.4 拉挤成型工艺

据文献<sup>[10]</sup>报道,美国 Moldite Technologies 公司声称已研制出一种可拉挤的增强塑料/泡沫塑料夹层结构。已申请专利的工艺方法为:用纤维增强外表面板和一闭孔状泡沫芯组成的这种材料是在拉挤成型期间形成的,成品结构外表面板的干纤维(预成型)料还在拉挤成型时被由泡沫芯流动来的树脂浸透。

## 2.5 RTM 成型工艺

传统的 RTM 成型工艺由于受到材料品种及其性能、模具成本和树脂流动阻力对注射压力的需求等限制,很难适应大尺寸及厚壁制品的生产要求。而树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构件一般为大尺寸及厚壁制品,其中的泡沫芯压缩性能有限,不能承受过大的注射压力,因此采用传统的 RTM 工艺难以制造合格的树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构件。近年来,国内外研制开发了真空辅助 RTM 成型技术(Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding)简称 VARTM。与传统的 RTM 工艺相比,其模具成本可以降低 50%~70%,且可以充分消除气泡缺陷;因此 VARTM 技术正迅速地得到推广<sup>[11]</sup>。美国 Foam Matrix, Inc. 公司报道了采用改进的 RTM 工艺制造树脂基复合材料蒙皮/泡沫塑料夹层结构。

利用 VARTM 成型技术来制造树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构件的工艺方法,应该首推 SCRIMP 成型工艺。SCRIMP 成型工艺(Seeman Composite Resin Infusion Manufacturing/Molding Process)是一种新型的 VARTM 成型技术,是美国西曼复合材料(Seeman Composite)公司注册的专利技术<sup>[12~15]</sup>。SCRIMP 工艺的基本原理是在模具型面上铺放增强材料,将型腔边缘密封严密,在型腔内抽真空,再将树脂通过精心设计的树脂分配系统在真空作用下注入模腔内。根据促进树脂流动的树脂分配系统的不同,可将 SCRIMP 分为两种<sup>[16,17]</sup>:一种是高渗透介质型 SCRIMP,另一种是沟槽引流型 SCRIMP。高渗透介质型 SCRIMP 是采用铺设高渗透介质和一层树脂可渗透的剥离层的方法作为树脂分配系统的一种 SCRIMP 工艺;沟槽引流型 SCRIMP 则是通过在芯材

表面开槽、布设快速流道的方法作为树脂快速分配系统的一种 SCRIMP 工艺,其基本结构示意图见图 1。比较来讲,前者设计相对灵活且简单,但一些材料如剥离层、高渗透介质等不能重复使用,不仅产生了固体废弃物且增加了生产成本,充模速度也相对较慢。后者则可克服这些缺点,不需要高渗透介质和剥离材料,沟槽渗透率远远高于渗透介质,充模速度得到大幅度的提高<sup>[14]</sup>。

SCRIMP 工艺具有无与伦比的综合技术优势:该工艺方法灵活,真空袋压法能够成型的部件采用该工艺都可以成型。由于精心设置的树脂分配系统,使树脂胶液先迅速在长度方向上充分流动填充,然后在真空压力下在厚度方向缓慢浸润,大大改善了浸渍效果,减少了缺陷发生,使结构件具备良好的一致性和重复性。同样由于精心设置的树脂分配系统,使 SCRIMP 工艺尤其适合制造高品质的大型夹层结构部件,据报道单件制品的最大表面积可以达到  $185\text{ m}^2 \sim 1\ 866\text{ m}^2$ ,厚度为  $3\text{ mm} \sim 150\text{ mm}$ ,纤维质量分数最大可达 75%~85%,树脂浪费率低于 5%,节约劳动成本 50%以上,属于一种低成本制造技术<sup>[15~17]</sup>。国际上普遍认为 SCRIMP 工艺制造厚壁的大型平面、曲面的泡沫塑料夹层结构和加筋异型构件具有非常好的发展前景<sup>[14]</sup>,它能够制造均匀性能好、尺寸大、高质量的复合材料部件。

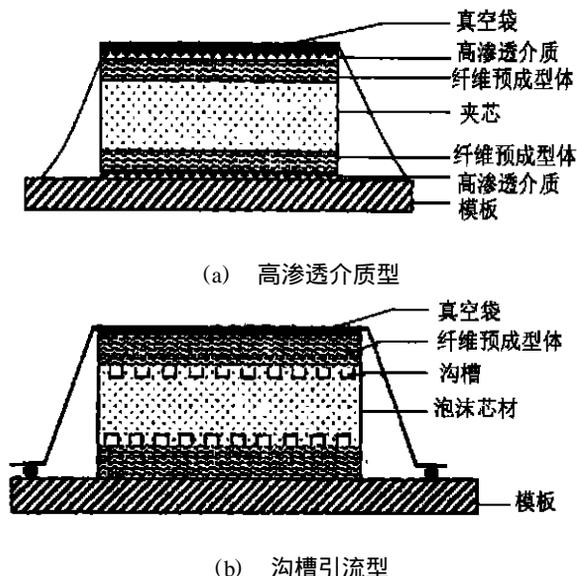


图 1 SCRIMP 工艺基本结构示意图

Fig. 1 Schematic of basic structure of SCRIMP technology

在国外,采用 SCRIMP 技术制造泡沫夹层结构

已成功用于舰船、军事设施、国防工程、航空和民用工业等诸多方面。据文献[18]报道,最近美国先进技术产品公司已获得波音公司510万美元的合同,将采用Intellitec厂的该RTM技术生产最先进的海军飞机——F/A-18E/F“超级大黄蜂”的复合材料襟翼整流罩,并在未来5年内,该公司将为每架F/A-18E/F生产30个零部件。美国Litton Avondale Industries公司<sup>[19]</sup>采用SCRIMP技术为美国海军制造的新的San Antonio(LPD17)级两栖作战登陆艇生产复合材料的先进电子天线塔/探测器(AEM/S)。瑞典海军新的YS2000 Visby级“隐身”反潜轻型巡洋舰,全长73 m,并有一梁长10.4 m,是迄今为止最大的复合材料夹层结构件。该夹层结构由DIAB Divinycell泡沫芯和碳纤维/乙烯基酯树脂基复合材料蒙皮组成,也是通过采用SCRIMP工艺制造<sup>[20]</sup>。

与蒙皮预浸料铺层共固化成型工艺类似的是,SCRIMP工艺同样要求泡沫芯具有非常高的闭孔率、一定的耐温和耐蠕变压缩性。其优点是制件外观质量较好、质量稳定、设备成本较低等;其不足之处在于SCRIMP工艺对树脂体系要求比较严格,要求树脂粘度一般在200 mPa·s~800 mPa·s范围内,因此树脂体系选择的余地较小,不能充分利用已有的预浸料用的高性能树脂体系(粘度一般较大)。

### 3 结语

泡沫夹层结构属于高效轻质材料结构,成型工艺有多种,对于具体结构的产品,尤其要应用到超大型结构时,在工艺上需要进行非常细致、全面的工作,具体选择何种成型工艺要综合考虑产品结构特点、设计对夹层结构的综合要求、所选芯材和蒙皮、使用要求、制造成本、制造周期等多种因素,并须对上述五种成型工艺方法进行细致地分析和比较,并且开展材料和工艺试验进行验证。对于超大结构成型工艺、热变形问题及材料匹配问题尤其须开展研究工作。只有在进行充分的方案论证和试验验证后,才可能明确最优的工艺方法。

### 参考文献

1 蔡良元,白树成,曲建直,张华,李德洪.某新型航天器返回舱舱门共形天线研制.宇航材料工艺,2000;30(5):66~69

- 2 沈坤元等译. PMI泡沫芯的新用途. 玻璃钢,2000;(1):35~37
- 3 达姆施塔特. PMI硬质泡沫. 玻璃钢,2000;(2):35~36
- 4 刘梦媛,曲建直,白树成. X-射线全身CT扫描机床板研制与生产. 见:2002年第十二届全国复合材料学术会议论文集,2002:673~676
- 5 赵鹏飞,张元明,何颖等. 玻璃钢蒙皮/聚氨酯泡沫塑料夹芯结构无人机机翼制造,一、工艺方案设计. 玻璃钢/复合材料,2001;(3):29~31
- 6 赵鹏飞,张元明,何颖等. 玻璃钢蒙皮/聚氨酯泡沫塑料夹芯结构无人机机翼制造,二、制造工艺过程. 玻璃钢/复合材料,2001;(4):10,37~39
- 7 何颖. 玻璃钢/聚氨酯泡沫塑料夹层结构两种成型工艺的比较. 工程塑料应用,1999;27(10):14~15
- 8 何颖,赵鹏飞. 玻璃钢/硬质聚氨酯泡沫塑料夹层结构的灌注工艺控制. 工程塑料应用,1998;26(12):13~14
- 9 金绪刚,龚克成,薛启寿. 硬质聚氨酯泡沫塑料夹芯结构的研制. 材料开发与应用,1995;10(3):39~41
- 10 沈坤元等译. 拉挤成型的轻型泡沫夹层结构保证高的强度. 玻璃钢,2001;(4):44
- 11 李柏松,王继辉,邓京兰. 真空辅助RTM成型技术的研究. 玻璃钢/复合材料,2001;(1):17~18,23
- 12 Seemann W H. U. S. Patent 4 902 215
- 13 Seemann W H. U. S. Patent 5 052 906
- 14 邓京兰,祝颖丹,王继辉. SCRIMP成型工艺的研究. 玻璃钢/复合材料,2001;(5):40~43
- 15 陈强,郭泓. SCRIMP成型工艺及其在船舶和基础工程领域的应用. 玻璃钢/复合材料,2001;(6):46~49
- 16 Xiudong Sun, Shoujie Li, James Lee L. Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding, Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium. Polymer Composites, 1998;19(6):807~817
- 17 Ni Jun, Li Shoujie, Sun Xiudong, James Lee L. Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding, Part II: SCRIMP based on grooves. Polymer Composites, 1998;19(6):818~829
- 18 蓝天. 采用树脂传递模塑法制造襟翼整流罩. 航空制造技术,2002;(5):43
- 19 沈坤元等译. 用SCRIMP工艺于天线塔. 玻璃钢,2001;(1):26
- 20 沈坤元等译. 世上最大的复合材料夹层结构物. 玻璃钢,2001;(2):36

(编辑 马晓艳)