

# PMI 泡沫夹层结构在航天航空工业的应用

赵锐霞 尹亮 潘玲英

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 介绍了国内外聚甲基丙烯酸酞亚胺(PMI)泡沫夹层结构复合材料的应用现状,分析了国内 PMI 泡沫夹层结构复合材料应用中存在的问题,认为迫切需要建立 PMI 泡沫夹层结构复合材料制造与验收标准体系。

**关键词** PMI 泡沫,夹层结构复合材料,航天航空,应用

## Application of Polymethacrylimide(PMI) Foam Cored Sandwich Structure in Aerospace Industry

Zhao Ruixia Yin Liang Pan Lingying

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The latest progress in PMI foam cored sandwich structure application is reviewed in this paper. There are still some problems in the application of domestic PMI foam cored sandwich composites. It is necessary to establish the manufacturing standard system for PMI foam cored sandwich composites.

**Key words** PMI foam, Sandwich structure, Aerospace, Application

### 0 引言

聚甲基丙烯酸酞亚胺(PMI)泡沫在德国首先研制成功并开始了工业化生产,具有密度小、耐高温、抗压和比强度高特点,具有优异的二次加工性能,可加温成形、机械加工成形,具有良好的与其他复合材料粘接及加温加压复合固化等综合性能,多被用于复合材料结构件的夹层材料。泡沫夹层结构中,使用低密度夹芯材料增加夹层结构厚度,可以在质量增加很少的前提下,大幅度提高结构刚度,达到减重及增强的效果。和蜂窝芯相比,在热压罐固化过程中,PMI 泡沫各向同性的孔隙结构还能满足侧压下尺寸稳定性的要求而无需用泡沫胶填充。另外,泡沫还能将热压罐的压力均匀地传递给泡沫下方面板的铺层,保证面板成型质量。近年来,泡沫夹层结构在航空航天及民用等领域大量应用。尤其在美日等发达国家,广泛应

用于航天航空领域。如 Delta 系列运载火箭有效载荷整流罩、级间段中间体、隔热罩和推进器鼻锥等结构、H-IIA 运载火箭整流罩、级间段、直升机的发动机短舱、桨叶、空中客车 A380 气密机舱的球面框、IAI 公司翼身整流罩等。本文主要介绍了 PMI 泡沫夹层结构的性能及应用情况。

### 1 国外 PMI 泡沫夹层结构的性能及应用

#### 1.1 PMI 泡沫主要性能特点

(1)易于机械加工,不需要特殊设备。

(2)100%的闭孔泡沫,且各向同性。

(3)和各种树脂系统以及热塑性树脂兼容(湿法和预浸料)。与铝蜂窝夹层比较,采用泡沫夹层,可以保证夹层与蒙皮的有效粘接。

(4)高热变形温度(180-240℃)。

(5)高强度质量比。PMI 基本力学性能见表 1。

表 1 PMI 泡沫的基本力学性能<sup>[1]</sup>

Tab. 1 Mechanical properties of PMI foam

类型	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	压缩强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	剪切强度 /MPa	弹性模量 /MPa	剪切模量 /MPa	断裂伸长率 /%	热变形温度 /℃
51WF	52.0	0.8	1.6	1.6	0.8	75.0	24.0	3.0	205
71WF	75.0	1.7	2.2	2.9	1.3	105	42.0	3.0	200
110WF	110	3.6	3.7	5.2	2.4	180	70.0	3.0	200
200WF	205	9.0	6.8	12	5.0	350	150	3.5	200

(6)在加工过程中,具有很好的抗压缩蠕变性能,适用包括中温环氧、高温环氧以及 BMI 树脂预浸

料等的复合材料夹层结构共固化工艺。

#### 1.2 PMI 泡沫成型工艺

收稿日期:2010-12-15

作者简介:赵锐霞,1971 年出生,高级工程师,主要从事树脂基复合材料方面的研究工作

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;另一类是玻璃纤维/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<sup>[2]</sup>。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、模压、真空袋压/热压罐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。

对于不同的结构形式,PMI 泡沫也需要相应的结构形式。通常根据泡沫的类型、密度、厚度和成型的复杂性采用热成型-冷成型、真空加热法、硅橡胶带压法等不同的成型方法(图1-图3)<sup>[1]</sup>,也可以采取机械加工方法来实现。

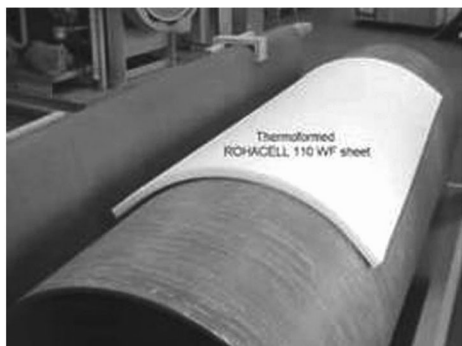


图1 模压成型

Fig. 1 Molding forming process



图2 真空吸附成型

Fig. 2 Vacuum absorption forming process

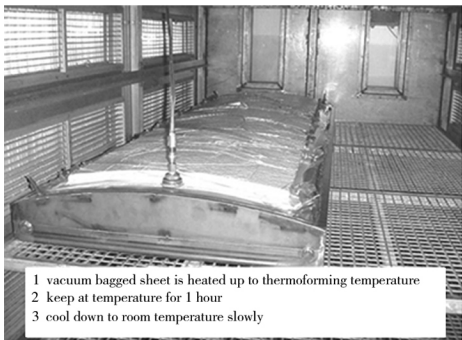


图3 热成型

Fig. 3 Thermoforming process

### 1.3 泡沫夹层结构无损检测技术

目前,适用于 PMI 泡沫夹芯结构的无损检测方法主要有超声和激光错位散斑干涉无损检测<sup>[3]</sup>。针对泡沫夹层结构中不同缺陷采用不同的检测方法:(1)空气耦合超声可以用来检测泡沫夹层结构中面板的缺陷,面板和芯材之间的脱粘以及芯材的缺陷;(2)超声脉冲回波方法可用来检测泡沫夹层结构复合材料面板的孔隙率及面板和芯材之间的脱粘;(3)激光错位散斑干涉可以检测泡沫夹层结构的近表面缺陷<sup>[4]</sup>;(4)电子剪切成像是—种检测大面积泡沫夹层结构的有效方法<sup>[5]</sup>。

### 1.4 PMI 泡沫夹层结构的应用

在航天航空领域,某些部件泡沫夹层结构已取代蜂窝夹层结构,成为飞行器减重增强的手段之一。PMI 泡沫在进行适当的高温处理后,能承受复合材料固化工艺的高温要求,这样使得 PMI 泡沫在航天航空领域得到了广泛的应用。PMI 泡沫具有很好的压缩蠕变性能,可以在 120-180℃、0.3-0.5 MPa 的热压罐中固化,通常能满足预浸料固化工艺的蠕变性能要求,可以实现夹层结构的共固化。

#### 1.4.1 在运载火箭中的应用

PMI 泡沫在运载火箭整流罩中有大量的应用。在 Delta II、III、IV 和 H-IIA 火箭整流罩中,采用了 ROHACELL<sup>®</sup> 泡沫和环氧预浸料面板共固化制造技术,其中 Delta II 火箭整流罩是由两个大约 9 m 长的 ROHACELL<sup>®</sup> PMI 泡沫半壳组成(图4)<sup>[6]</sup>,采用 ROHACELL<sup>®</sup> 泡沫半壳和环氧预浸料面板共固化技术,具有优异的抗压压缩蠕变性能,可以使用热压罐固化工艺。

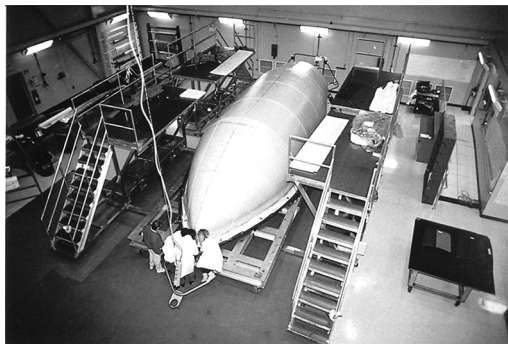


图4 置于真空袋中的 Delta II 半个整流罩

Fig. 4 Fully-bagged half payload fairing for Delta II

波音公司新的 Delta IV 系列运载火箭中,在有效载荷整流罩、级间段中间体、隔热罩和推进器鼻锥结构中都是采用了 ROHACELL<sup>®</sup> 芯材夹层结构的设计方案(图5)<sup>[6]</sup>。Delta IV 大载荷运载火箭的整流罩长 25 m,直径 5.5 m,是目前世界上采用共固化工艺制作的—最大泡沫夹层结构件。PMI 泡沫夹层结构大约占 Delta 4 重型火箭结构的 40%。三菱重工利用热成形的优点在 H-IIA 运载火箭的整流罩中共固化 ROHACELL<sup>®</sup> (图6)<sup>[7]</sup>,第一级和第二级连接的结构体级间段为直

径 4 m、高 7 m 的圆柱体(图 7)<sup>[7]</sup>。根据 H-IIA 和 Delta II 运载火箭的设计分析,复合材料泡沫夹层结构可整体成型,较铝蜂窝结构可降低工艺成本。

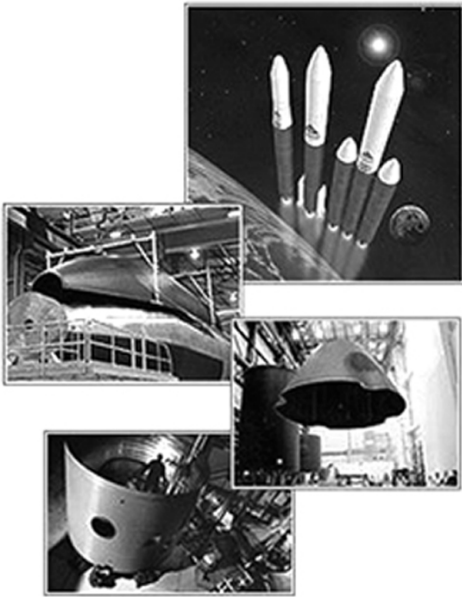


图 5 Delta IV 中 PMI 泡沫夹层结构件  
Fig. 5 PMI cored components for Delta IV



图 6 H-IIA 整流罩  
Fig. 6 Payload fairing for H-IIA

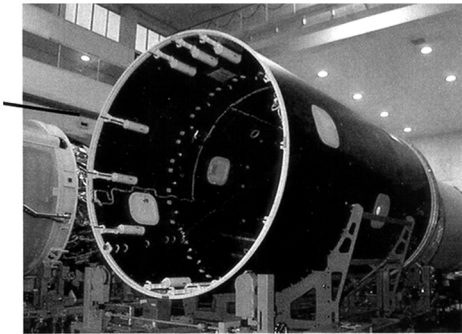


图 7 H-IIA 级间段  
Fig. 7 Interstage section for H-IIA

#### 1.4.2 在直升机结构中的应用

1971 年 ROHACELL® PMI 泡沫就在欧洲直升机公司 (Eurocopter) Ecureuil EC120<sup>[7]</sup> 型号上得以使用,并取得了第一个航空论证。伴随着其在该型号直升机平台上机身及主桨叶上的应用,高性能 PMI 泡沫开始在更多直升机机型中持续成功使用。

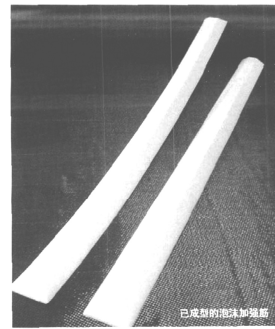
新一代“虎”式直升机的发动机短舱是使用 PMI 泡沫 ROHACELL® 71XT-HT 作为芯材,和 BMI 预浸

料共固化,热压罐共固化工艺,构件的长期使用温度达到 160℃,只有使用 ROHACELL® XT 才能实现共固化,在降低成本的同时减轻质量。

欧洲直升机公司在所有系列的直升机型号中大量使用了 PMI 泡沫。NH90 直升机尾桨叶、根部使用的是 110WF 泡沫材料;EH101 直升机主桨叶、尾桨叶均采用的是 70WF、51WF; Tiger 直升机使用的是 70WF,模压工艺,中温固化。泡沫良好的力学性能指标能提高在桨叶设计中常用的 U 形梁的结构稳定性。由于其具有杰出的抗疲劳性能,PMI 泡沫能够承受直升机桨叶在使用过程中产生的高动力载荷,这也是其他任何刚性泡沫无法与之相比的。

#### 1.4.3 在飞机结构中的应用

泡沫夹层结构在空中客车飞机气密舱的球面框、IAI 公司的翼身整流罩等结构上有大量的应用。空中客车 A340-500/600(图 8) 选择 PMI 泡沫加强气密机舱的隔板,泡沫密度 75 kg/m<sup>3</sup>、固化温度 180℃、固化压力 0.35 MPa,泡沫夹层的加强筋大幅度提高隔板的稳定性; A380 气密机舱的球面框采用了 ROHACELL 泡沫填充 A 筋条结构形式<sup>[8]</sup>,首先,把泡沫精确加工和热成形,然后上下蒙皮共固化。



已成型的泡沫加强筋<sup>[6]</sup>



图 8 A340 机身气密舱球面框<sup>[6]</sup>  
Fig. 8 Pressure bulkhead of A340-600<sup>[6]</sup>

使用 PMI 泡沫芯可以用作芯模制造帽形加强筋条,可以降低构件的铺层和固化工艺成本。预浸料可以方便地铺设在泡沫芯模上。PMI 泡沫各向同性的空隙结构和在热压罐固化周期良好的耐压缩蠕变性能使得一步共固化工艺更容易实现。泡沫屈曲增强的帽筋条的性能远远超过空心筋条,因为由失稳导致的破坏几乎都转变成结构屈服破坏。这也使得在筋条设计过程中,可以减少筋条的壁厚,进而大幅度减轻质量。优化的效果取决于加强筋的实际几何尺寸,经过优化破

坏载荷可以提高 40%。屈曲载荷提高近 100%。

## 2 国内泡沫夹层复合材料研究及应用

### 2.1 国产 PMI 泡沫研究进展

国内目前已经开展 PMI 泡沫的研制工作,但整体性能与国外仍有一定差距。近年来航天材料及工艺研究所、中国科学院化学所、国防科技大学、西北工业大学等开展了 PMI 泡沫的研制,取得了一定进展。航天材料及工艺研究所研制的耐高温、隔热、透波 PMI 泡沫

表 2 110WF PMI 泡沫基本力学性能

Tab.2 Mechanical properties of 110WF PMI foam

密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa	平压强度/MPa	平压模量/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa
110	3.93	177	2.84	123	5.00	201

表 3 泡沫夹芯结构与铝蜂窝夹芯结构性能对比

Tab.3 Comparison of properties for foam cored sandwich structures and aluminium honeycombs

结构形式	夹芯结构厚/mm	面板厚/mm	芯子规格/mm	平压强度/MPa	平压模量/MPa	纵向侧压强度/MPa	纵向侧压模量/GPa	纵向弯曲刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	纵向弯曲强度/MPa	纵向弯曲模量/GPa	双压剪强度/MPa	双压剪模量/MPa
碳面板/PMI 泡沫	32.0	1.2	30	3.63	158	47.7	8.71	4880	322	112	0.969	52.0
铝面板/铝蜂窝	28.8	0.4	0.05×5	1.49	422	8.40	2.02	791	294	72.7	0.732	146

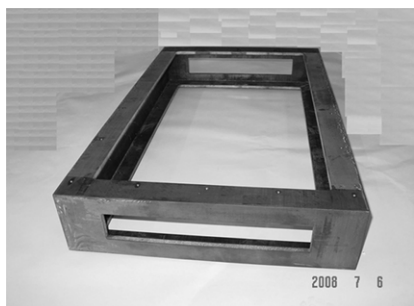


图 9 共固化泡沫夹层结构框架

Fig.9 Co-curing foam-cored sandwich structure frame



图 10 分步固化泡沫夹层结构锥段半罩

Fig.10 Step-cured foam cored sandwich structure half fairing

由于泡沫结构的特殊性,需要采取低于普通超声波(400 kHz)的频率进行检查。目前采用较多的是 50-140 kHz 的频率。北京航空工艺研究所自行研制了 FCC-A-1 复合材料无损检测仪,可以检查泡沫和胶层之间、胶层和层板之间的内部缺陷,检查的最小缺陷为  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ <sup>[10]</sup>。同时,还存在 PMI 泡沫受进货周期制约,成本价格较高等问题。

### 2.3 夹层结构复合材料的发展需求

新一代运载火箭整流罩锥段将采用 PMI 泡沫夹

材料,主要性能已达 ROHACELL 的水平<sup>[9]</sup>。

### 2.2 泡沫夹层复合材料应用研究及存在的问题

航天材料及工艺研究所进行了新型泡沫芯材特性、泡沫热成形工艺以及泡沫夹层结构成型工艺等研究,基本掌握了泡沫夹层结构的共固化及分步固化的成型工艺。泡沫夹层结构修补及无损检测技术正在进一步研究中。110WF PMI 泡沫及其夹层结构力学性能见表 2、表 3。两种固化工艺成型结构件见图 9、图 10。

层结构,运载火箭其他部段也可能会采用泡沫夹层结构。航空领域,机翼前缘和方向舵、起落架舱门、翼身/翼尖整流罩等对泡沫芯材夹层结构也有较大需求。

## 3 结语

高性能泡沫芯材的研制和应用是泡沫夹层结构复合材料应用的关键。PMI 泡沫夹层结构复合材料工程应用必须依赖于成熟的工艺,迫切需要形成一套完整的泡沫夹层结构复合材料制造与验收的标准体系。

### 参考文献

- [1] 胡培. ROHACELL® 技术手册. 德固萨(中国)投资有限公司上海分公司,2005,28:53-54
- [2] 胡培,陈志东,薛元德,等. 泡沫夹层结构的模压共固化成型工艺及参数选定[J]. 工程塑料应用,2007,35(8):25-28
- [3] 刘松平. 复合材料无损检测与缺陷评估技术[J]. 无损检测,2008,30(10):673-678
- [4] 胡培. PMI 泡沫复合材料夹层结构的无损检测方法[J]. 材料工程,2009(S2):354-358
- [5] Uwe Lang. PMI 泡沫芯材夹层结构无损检测(NDT)的新方法[C]. SAMPE, 2008
- [6] Hermann Seibert. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures[J]. Reinforced Plastics, 2006(1):44-48
- [7] Hermann Seibert. Technical Presentation on ROHACELL® [C]. China Composites, 2005
- [8] 胡培,陈秀华. PMI 泡沫夹芯结构在 A380 后压力框上的应用[J]. 航空制造技术,2009(15):46-49
- [9] 赵飞明,安思彤,穆哈. 聚甲基丙烯酸酰胺(PMI)泡沫研制现状[J]. 宇航材料工艺,2008,38(1):1-9
- [10] 贾欲明,韩全民,李巧,等. 泡沫夹层结构在飞机次承力结构中的应用[J]. 航空制造技术,2009(S1):8-12

(编辑 李洪泉)