

# PMI 泡沫夹层结构整流罩冯卡门锥段成型技术研究

赵锐霞 尹亮 潘玲英

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 对 PMI 泡沫夹层结构整流罩冯卡门锥段成型技术进行了研究,通过对玻璃钢面板及其泡沫夹层结构性能、面板成型、泡沫热成形、泡沫拼接、玻璃钢泡沫夹层结构成型及无损检测等技术研究,确定了玻璃钢外面板、预先固化,然后与泡沫等复合组装,最后铺覆内面板,整体进罐固化的成型工艺。结果表明,玻璃钢面板纵、横向拉伸强度为 602、593 MPa,模量为 26.0、27.2 GPa,满足设计强度 $\geq 350$  MPa、模量 $\geq 25$  GPa 的要求;玻璃钢/PMI 泡沫夹层结构泡沫密度为 $(110\pm 10)$  kg/m<sup>3</sup>,厚度 28 mm,纵、横向侧压强度为 32.9、30.5 MPa,模量为 2.31、2.38 GPa,满足设计指标侧压强度 $\geq 25$  MPa、模量 $\geq 2.0$  GPa 的要求,采用玻璃钢/PMI 泡沫夹层结构分步固化成型工艺研制的首件新型号整流罩冯卡门锥段,满足设计使用要求。

**关键词** 泡沫夹层结构,冯卡门锥段,成型技术

## Processing Technology of Von Karman Fairing Fabricated by PMI Foam Sandwich Structure

Zhao Ruixia Yin Liang Pan Lingying

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

**Abstract** The processing technology of Von Karman Fairing Fabricated by PMI Foam Sandwich Structure was investigated. The processing method was determined by the investigation on the properties of glass fiber reinforced composite and foam structure, the thermoforming and splicing of foam, the processing of composite and sandwich structure, and the nondestructive testing technology. The results show that the longitudinal and transverse strength of glass reinforced composite panel are respectively 602 MPa and 593 MPa. The longitudinal and transverse modulus of panel are respectively 26.0 GPa and 27.2 GPa. The longitudinal and transverse edgewise compression strength of foam sandwich structure with density of  $(110\pm 10)$  kg/m<sup>3</sup> and thickness of 8mm are respectively 32.9 MPa and 30.5 MPa. The longitudinal and transverse edgewise compression modulus of foam sandwich structure are respectively 2.31 GPa and 2.38 GPa. The mechanical properties of panel and foam sandwich can meet the design requirements. In addition, the lest Von Karman Fairing fabricated with the PMI foam sandwich structure with glass fiber reinforced composite panel by the step-cured processing can also meet the design requirement.

**Key words** Foam sandwich structure, Von Karman Fairing, Processing technology

### 0 引言

聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫具有密度小、耐高温、抗压强度高、比强度高特点,具有优异的二次加工性能,可加温或机械加工成型,可与其他复合材料粘接及加温加压复合固化,多被用于复合材料结构件的夹层材料<sup>[1]</sup>。

新一代运载火箭整流罩是迄今为止国内设计的最大整流罩,锥段为冯·卡门外形(原始卵形,Von Karman),由两个半罩组成,直径为 5 200 mm,采用

1.2 mm 厚玻璃钢面板、28 mm 厚 ROHACELL 110WF 泡沫芯子组成的夹层结构,该结构具有良好的气动外形、隔热性、制造工艺性及吸声降噪能力。

泡沫夹层结构复合材料系国内首次在整流罩冯卡门锥段上使用。本文针对玻璃钢/PMI 泡沫夹层结构复合材料成型中涉及的玻璃钢面板及其泡沫夹层结构性能、面板成型、泡沫热成形、泡沫拼接、玻璃钢泡沫夹层结构成型及无损检测等技术开展研究。

### 1 实验

收稿日期:2012-06-01

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。E-mail:htyzyrx@sina.com

## 1.1 原材料

SW180D-90a/602 热熔预浸料, 自制; PMI 泡沫, ROHACELL 110WF, 德国德固萨生产; J-47 中温固化胶黏剂, 黑龙江省科学院石油化学研究院生产。

## 1.2 泡沫夹层结构试样制备

采用分步固化与共固化结合的成型工艺, 先将面板按设计要求进行铺层, 一侧面板预先固化, 然后与另一侧面板通过界面胶与泡沫复合后, 进热压罐加热加压固化。试样规格: 面板 1.2 mm、芯材 28 mm。

## 1.3 玻璃钢复合材料平板性能测试

采用岛津国际贸易有限公司 AG-X300kN 型数控电子万能试验机, 拉伸、压缩、弯曲、层剪性能分别按 GB/T1447—2005、QJ1403A—2004、GB/T1449—2005、DqES81—98 进行测试。

## 1.4 泡沫及其夹层结构性能测试

采用长春科新试验仪器研究所 WD4050 电子万能试验机进行, PMI 泡沫拉伸、平压、弯曲性能分别按 DqES184—98、GB/T1453—2005、GB/T8812—1988 进行测试; 泡沫夹层结构平压、弯曲、侧压性能分别按 GB/T1453—2005、GB/T1456—2005、GB/T1454—2005 进行测试, 侧压性能用美国 MTS Sintech65/G 试验机进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SW180D-90a/602 玻璃钢面板性能

树脂基体及其固化工艺直接影响玻璃钢面板性能, 在综合考虑整流罩分步固化成型工艺基础上, 为满足面板中温固化要求, 对树脂体系固化工艺进行了调整, 进行了 1.2 mm 厚 SW180D-90a/602 铺层板纵、横向力学性能测试, 结果见表 1。

表 1 SW180D-90a/602 铺层板力学性能

Tab.1 Mechanical properties of SW180D-90a/602 laminate

项目	纵向拉伸强度 /MPa	纵向拉伸模量 /GPa	横向拉伸强度 /MPa	横向拉伸模量 /GPa	纵向压缩强度 /MPa	纵向压缩模量 /GPa	横向压缩强度 /MPa	横向压缩模量 /GPa	纵向弯曲强度 /MPa	纵向弯曲模量 /GPa	横向弯曲强度 /MPa	横向弯曲模量 /GPa	纵向层剪强度 /MPa	横向层剪强度 /MPa
$\bar{X}$	602	26	593	27.2	545	27.8	472	29	776	21.1	657	20.7	70.3	67.4
S	11	0.74	21	1.1	21	0.62	26	0.72	32	0.58	35	1.7	1.4	1.1
$C_v$	1.8	2.8	3.5	4	3.9	2.2	5.5	2.5	4.1	2.7	5.3	8.2	2	1.6

从表 1 可以看出, SW180D-90a/602 铺层板纵、横向拉伸强度为 602、593 MPa, 模量为 26.0、27.2 GPa, 满足设计指标强度  $\geq 350$  MPa, 模量  $\geq 25$  GPa 的要求。

### 2.2 PMI 泡沫及其夹层结构性能

PMI 泡沫夹层结构芯材采用密度  $110 \text{ kg/m}^3$ 、厚 28 mm 的 PMI 泡沫, 其性能见表 2。玻璃钢泡沫夹层结构试样测试结果见表 3。

表 2 PMI 泡沫性能

Tab.2 Properties of PMI foam

项目	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /MPa	断裂伸长率 /%	平压强度 /MPa	平压模量 /MPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa
$\bar{X}$	2.46	195	1.41	3.71	169	3.96	150
S	0.24	9.1	0.31	0.19	10	0.25	3.7
$C_v$	10	4.6	22	5.1	5.9	6.3	2.5

表 3 玻璃钢/泡沫夹层结构力学性能

Tab.3 Mechanical properties of foam sandwich with glass fiber reinforced composites panel

项目	平压强度 /MPa	平压模量 /MPa	纵向弯曲刚度 /kN·m <sup>-2</sup>	纵向弯曲强度 /MPa	纵向弯曲模量 /GPa	纵向剪切刚度 /kN	纵向剪切模量 /MPa	横向弯曲刚度 /kN·m <sup>-2</sup>	横向弯曲强度 /MPa	横向弯曲模量 /GPa	纵向侧压强度 /MPa	纵向侧压模量 /GPa	横向侧压强度 /MPa	横向侧压模量 /GPa		
$\bar{X}$	3.84	164	0.926	312	30.5	131	75.2	0.933	301	30.8	127	73.2	32.9	2.31	30.5	2.38
S	0.08	7.1	0.014	17	0.41	5.8	3.4	0.032	14	1.1	4.8	2.9	3.7	0.12	3.4	0.08
$C_v$	2.1	4.3	1.5	5.4	1.3	4.4	4.5	3.4	4.7	3.6	3.8	4	11	5.2	11	3.4

从表 3 可以看出, 泡沫夹层结构性能中, 平压性能主要是芯材发挥作用, 与泡沫芯材性能相当; 弯曲性能和侧压性能主要是面板在起作用, 泡沫夹层结构纵、横向侧压强度分别为 32.9、30.5 MPa, 纵、横向侧压模量为 2.31、2.38 GPa, 满足设计侧压强度  $\geq 25$

MPa、侧压模量  $\geq 2.0$  GPa 的要求。

### 2.3 玻璃钢面板成型技术

玻璃钢面板采用手工铺层、热压罐成型工艺, 对玻璃钢面板成型工艺进行了试验, 成型后发现玻璃钢面板局部发白现象, 对局部白斑产生原因进行了初步

分析,认为面板固化过程中局部吸胶受阻,造成假真空,导致产品加压不到位,出现局部发白现象。通过面板固化包覆工艺改进试验,成型的玻璃钢面板质量良好。

## 2.4 泡沫热成形技术

PMI 泡沫具有较好的工艺性能,在一定的温度、压力下,依据模具形式进行辊弯,具有较好的热成形性能,采用烘箱加热后,阴、阳模热压制工艺,成形的泡沫多数出现了回弹现象,分析原因,主要是泡沫热压制中压力不够造成。根据“冯卡门”不可展开曲面外形特点,设计了多层泡沫板升降加热装置及泡沫芯热成形装置,泡沫加热后,通过升降架自动进出口,然后放于泡沫芯热成型模进行机械压制,完成泡沫热成形,保证了热成形质量,提高了效率,成功应用于冯卡门整流罩锥段半罩研制。

## 2.5 PMI 泡沫拼接技术

新型号整流罩冯卡门锥段,结构尺寸大,且曲面复杂,要求 PMI 泡沫拼接操作简单、适用期合理、工艺满足整流罩锥段半罩的固化工艺,针对上述工艺要求,研制了 PMI 泡沫拼接专用低密度糊状拼接胶,糊状拼接胶性能测试结果见表 4,拼接弯曲破坏模式见图 1。从泡沫拼接弯曲试样破坏模式可以看出,拼接胶性能优于 PMI 泡沫本体性能,拼接状态较好,易于实现大面积泡沫的拼接,与整流罩锥段半罩固化工艺的匹配性良好。

表 4 糊状拼接胶性能

Tab. 4 Properties of splicing adhesive

弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa	剪切强度 /MPa	压缩强度 /MPa	剪切强度/MPa	
				RT	150℃
3.23	162	2.18	83.4	19.7	20

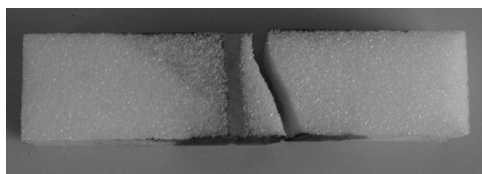


图 1 拼接泡沫弯曲破坏模式

Fig. 1 Flexural failure mode for spliced foam

## 2.6 泡沫夹层结构成型技术

泡沫夹层结构成型技术是泡沫芯材应用的核心技术。对于泡沫夹层结构整体而言,有拼接缝胶接技术、加强区成型技术、与金属件对接组装技术、面板成型及组装固化技术等,这些方面直接影响产品外观及内在质量的控制,最终影响产品整体质量。

泡沫夹层结构通常有共固化和分步固化两种成型工艺,考虑冯卡门外形曲面特点及锥段结构形式,选用共固化与分步固化结合方式,先将外面板预先固化,然后与 PMI 泡沫、金属边框等组装,铺覆内面板后进行共固化的成型工艺,工艺流程见图 2。工艺试验件成型

后发现,内表面靠近金属边框的区域,表面出现了不平整现象,经分析认为,主要是泡沫与边框对接处处理不佳及存在高度差,造成固化后表面不平整,经过泡沫与边框对接处工艺改进及其组装高度差控制,成型的新型号整流罩锥段半罩的整体质量良好。

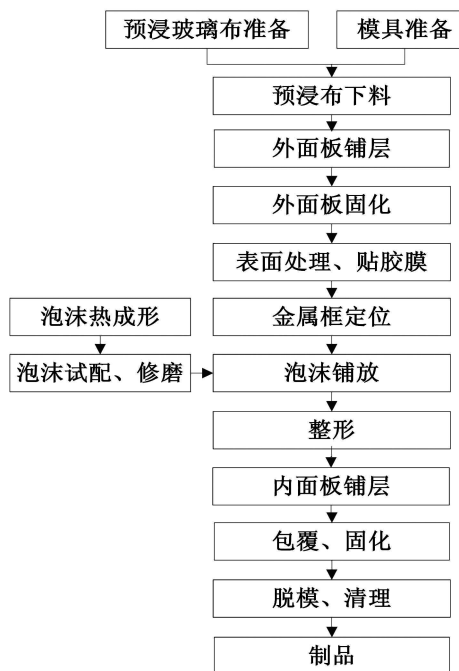


图 2 玻璃钢/泡沫夹层结构成型工艺流程图

Fig. 2 Processing flow diagram of foam sandwich structure with glass fiber reinforced composite panel

## 2.7 泡沫夹层结构无损检测技术

PMI 泡沫夹层结构首次在整流罩冯卡门锥段使用,泡沫夹层结构复合材料检测没有成熟的标准方法,通过红外无损检测法、敲击检测法、水穿透超声检测法、错位散斑无损检测法等多种检测方法的摸索,以及预埋缺陷试验件缺陷位置、形状、大小的检测分析,最终确定了错位散斑无损检测方法。

## 3 结论

(1) SW180D-90a/602 玻璃钢面板纵、横向拉伸强度为 602、593 MPa,模量为 26.0、27.2 GPa,满足设计强度  $\geq 350$  MPa,模量  $\geq 25$  GPa 的要求;玻璃钢/PMI 泡沫夹层结构[泡沫密度为  $(110 \pm 10)$  kg/m<sup>3</sup>,厚度 28 mm]纵、横向侧压强度为 32.9、30.5 MPa、模量为 2.31、2.38 GPa,均满足设计侧压强度  $\geq 25$  MPa、侧压模量  $\geq 2.0$  GPa 的要求。

(2) 整流罩冯卡门锥段成型采用玻璃钢外面板预先固化,然后与泡沫等复合组装,最后铺覆内面板,整体进罐固化的成型工艺合理、可行,可用于新型号箭体结构整流罩冯卡门锥段产品的研制。

## 参考文献

[1] 胡培. ROHACELL 技术手册[M]. 德固赛(中国)投资有限公司上海分公司. 2005

(编辑 李洪泉)