

夹芯结构中的聚合物泡沫材料和蜂窝的比较

Altadt V. Diedriches F. and Lenz T, et al.

摘 要

在压缩试验,四点弯曲试验和重物冲击试验的基础上,作者对两种聚合物闭孔泡沫(PEI和PMI)夹层板和蜂窝夹层板的力学性能进行了比较。

1 介 绍

根据 Corden 的介绍,结构夹层板中用作芯材的闭孔聚合物泡沫和蜂窝芯材相比,具有一定的综合优势。这一观点在实际应用中已被广泛认同。

廉价的加工费用、各向同性的力学性能、较低的吸水率都是闭孔聚合物泡沫和蜂窝芯材相比的主要优点所在。

Lee 讨论了夹层板固化的基本知识和夹层板的力学性能。和蜂窝相同,聚甲基丙烯酰亚胺 PMI 泡沫非常适合用于轻质复合材料结构。Dean 和 Starlinger 认为聚醚酰亚胺 PEI 和蜂窝相比,在和铝面板复合时,具有非常好的力学性能。在德国,新的 Transrapid 磁悬浮系统中 PEI 泡沫的夹层板被用作车壳。Craft、Hughes 和 Kelkar 介绍了采用碳纤维增强聚合物做面板时 PMI 芯材的低速抗冲击性能。尽管目前有大量介绍各种芯材和面板复合的文章,但是对于结构应用而言,仍有必要在相同条件下系统地比较各自的性能。即在相同的固化和测试方法条件下,比较用作芯材的传统蜂窝材料和聚合物泡沫的性能。另外,还检测了芯材和面板之间粘结层的性能。

在研究中,夹层板是在相同条件下固化,压力罐的固化时间相同,这样保证不同的芯材之间具有可比性。对粘合夹芯结构而言,因为受压和弯曲是最基本的荷载形式,所以做了压缩和四点弯曲试验。通过垂直于面板方向的拉伸试验,检测芯材和面板之间的结构粘结层的作用,最后,使用重物下落冲击试验检验夹芯材料能量的吸收指标。

2 材料和测试方法

2.1 材料

在试验中选择了两种闭孔聚合物泡沫产品和一种常用的蜂窝产品(表1)。我们知道,在航空工业中,通常使用 $70\sim 80\text{kg/m}^3$ 的泡沫代替 48kg/m^3 的蜂窝。

表 1 芯 材

类 型	芯 材	密 度
泡 沫	PEI	80 kg/m ³
泡 沫	PMI	71 kg/m ³
蜂 窝	Aramid 芳纶纸	48 kg/m ³

PEI 聚醚酰亚胺泡沫具有良好的耐高温性能和耐火性能。它不吸水，适用于飞机内部装修、火车和公路交通工具的闭孔各向同性泡沫材料，可以在高温的环境中使用。化学分子式如图 1 所示。

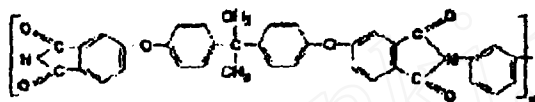


图 1 聚醚酰亚胺 PEI 的化学分子式

PMI 聚甲基丙烯酸酰亚胺泡沫是应用于航空领域的一种刚性闭孔泡沫。PMI 的化学结构式如图 2 所示。

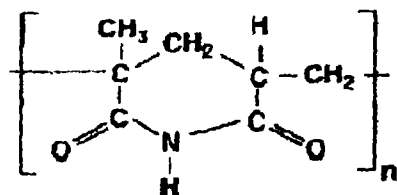


图 2 聚甲基丙烯酸酰亚胺 PMI 在发泡以后的化学分子式

PMI 泡沫的力学性能易受含水量的影响。因而，在加工使用以前，PMI 泡沫产品必须放置在防潮包装材料内。

Cormaster C148 蜂窝是采用“Nomex”为原材料，Nomex 是一种浸过环氧树脂的芳纶纤维纸产品。使用热固性的粘结剂将纸张在节点位置粘住，拉伸扩张成蜂窝结构，再浸入聚酰亚胺树脂中。在这种工艺过程中，可以生产出不同厚度(纸)、不同的密度和不同大小的蜂窝。从航天航空领域到各种商业领域，蜂窝作为具有较高韧性和耐候性的夹芯材料在使用。

使用(±45°)树脂体积含量 35% 的单向环氧预浸料(Brochier 公司的 Vicotex NCHR 6376 预浸带)作为面层材料，面层材料和芯材之间的粘结膜采用 CYTEC 工程材料公司生产的 FM300K。夹层板在制造中有两种情况：

芯材和面层材料之间有粘结层；

芯材和面层材料之间没有粘结层。

在压缩试验中，还检测了芯材自身的强度。

表 2 试验中使用的标识

试 样	芯 材	标 识
夹芯材料自身	PEI	PEI-0
有粘结膜的夹层板	PEI	PEI-1
无粘结膜的夹层板	PEI	PEI-2
夹芯材料自身	PMI	PMI-0
有粘结膜的夹层板	PMI	PMI-1
无粘结膜的夹层板	PMI	PMI-2
蜂窝材料自身	蜂窝	蜂窝-0
有粘结膜的蜂窝层板	蜂窝	蜂窝-1
无粘结膜的蜂窝层板	蜂窝	蜂窝-2

2.2 固化

试验用的夹层板条都是在一压力罐平板上平行制作,这样就可以保证夹层板的固化工艺条件具有可比性。压力罐的固化条件是 180℃、0.35Mpa、2h。在固化前后,通过测量每一个夹层板中部的厚度来检验压缩率。使用金刚石的锯条切割制成各个试验样本。

2.3 测试

抗压试验、拉伸试验和四点弯曲试验是使用 Zwich 通用测试机(Model 1475),在 90℃ 的温度条件下,分别采用 2mm/min(压缩试验),10mm/min(四点弯曲试验)的加载速度。试验在加荷信号降至 40%时结束。压缩试验的试样尺寸是 75mm×75mm×tmm 的长方体,拉伸试验的试样尺寸是 50mm×50mm×t,四点弯曲试验的试样尺寸是 400mm×50 mm×t,其中 t 是试样的厚度。试样具有不同的厚度,如表 3~5 所示。

表 3 夹层板压缩试验试样的厚度

	PEI-0	PEI-1	PMI-0	PMI-1	蜂窝-0	蜂窝-1
厚度(mm)	13.0	13.3	13.0	13.8	13.0	13.5

表 4 夹层板拉伸试验试样的厚度

	PEI-1	PEI-2	PMI-1	PMI-2	蜂窝-1	蜂窝-2
厚度(mm)	12.8	12.9	13.4	13.7	13.8	13.6

表 5 夹层板四点弯曲试验试样的厚度

	PEI-1	PMI-1	蜂窝-1
厚度(mm)	10.1	10.7	10.7

表 6 夹层板落体冲击试验试样的厚度

	PEI-1	PEI-2	PMI-1	PMI-2	蜂窝-1	蜂窝-2
厚度(mm)	11.8	11.4	13.5	13.4	13.4	13.3

3 结 果

3.1 固化压缩现象

压力罐固化的夹层板压缩试件的尺寸稳定性是一个非常重要的指标,同时试件尺寸也用来计算夹芯结构的惯性矩。

表 7 表明夹层板固化前的厚度(t_A),固化后的厚度(t_B)和压缩率。PEI 泡沫芯材夹层板的压缩率最大。在更低压力的压力罐固化工艺(180 C, 2 巴, 2h)下,结果类似。造成不同的原因是两种泡沫芯材泡沫结构的差异。在图 3 中,表明了两种泡沫的常见结构。很明显,PEI 泡沫(a)中孔隙大小的分布范围比 PMI 泡沫离散。据此,可以得出均匀的泡沫孔隙分布会降低固化前后层板的压缩。

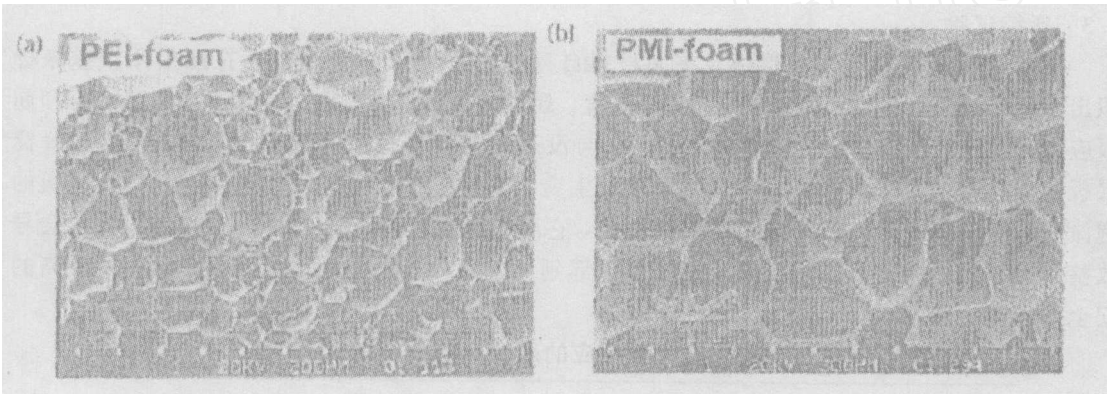


图 3 PEI 和 PMI 泡沫的结构形态

表 7 压力罐固化后的压缩变形(180 C, 3 巴)

	t_A (mm)	t_B (mm)	压缩率(%)
PEI-1	14.4	12.8	11.1
PEI-2	14.0	12.9	7.9
PMI-1	14.4	13.4	6.9
PMI-2	14.0	13.7	2.1
蜂窝-1	14.4	13.8	4.2
蜂窝-2	14.0	13.6	2.9

3.2 电报现象

在压力罐中固化以后,夹层板的表面质量存在明显差异。蜂窝芯材的夹层板会出现表面的不平整,就是著名的电报效应。但是聚合物泡沫芯材的夹层板却有非常光滑的表面。(图 4)

因为压力罐中有压力存在,复合材料面材由六边形蜂窝的侧板支撑,面材会产生六边形的凹陷,这就是所谓的“电报效应”。对聚合物泡沫芯材,不存在这样的现象,因为泡沫孔隙

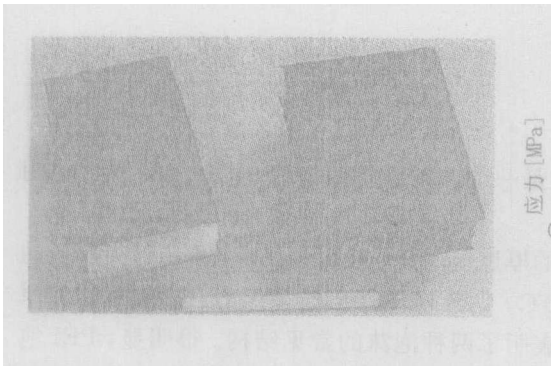


图4 泡沫芯材和蜂窝芯材夹层板表面比较的直径较小,能够支撑面板。

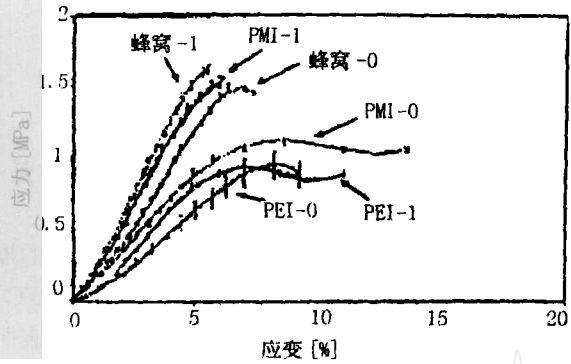


图5 用了粘结膜的夹层板和泡沫芯材在90°C情况下压缩试验的应力-应变曲线

3.3 压缩试验

图5表明有粘结膜时夹层板及夹芯材料自身的应力-应变关系曲线。在图中用误差条标识出试验标准差。芯材和面板复合以后,刚度、屈服应力提高,屈服应变降低。按照刚度和屈服应力,蜂窝的压缩性能要比其他芯材好。与没有复合材料面板的泡沫材料自身相比,蜂窝层板的破坏是一种脆性破坏,弯曲过程中发生突然断裂。对于后者,即没有复合材料面板的泡沫材料自身,由于孔隙状微观结构的存在,它属于延性破坏。某一个孔隙的破坏并不会导致整个夹层板的破坏,破坏必须从试样的顶部延伸到底部。这样,可见泡沫具有相对较高的安全系数。

表6 屈服应力和相应的压缩试验的标准误差

样件	面材	屈服应力 σ_f (N/mm ²)
PEI-0	-	1.0±0.1
PMI-0	-	1.1±0.03
蜂窝-0	-	1.5±0.02
PEI-1	+	0.9±0.02
PMI-1	+	1.5±0.03
蜂窝-1	+	1.7±0.03

以压缩试验的屈服应力为标准,得出的结论是:和有面材以及没有面材的泡沫材料相比,蜂窝的性能最好。PEI芯材材料的屈服应力明显较低,是因为这种材料的孔隙分布不均匀,如图3所示。

3.4 拉伸试验

通过和面材垂直方向的拉伸试验,可以反映芯材和面材之间的粘结情况。为此,对有粘结层和没有粘结层的夹层板进行了试验。拉伸的应力-应变曲线如图6所示。

蜂窝和PEI芯材的夹层板具有相同的

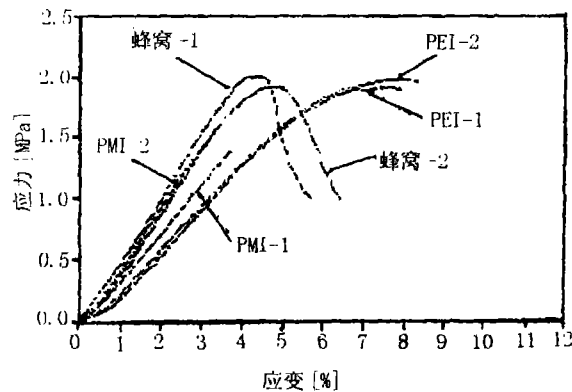


图6 90°C时的拉伸应力-应变曲线

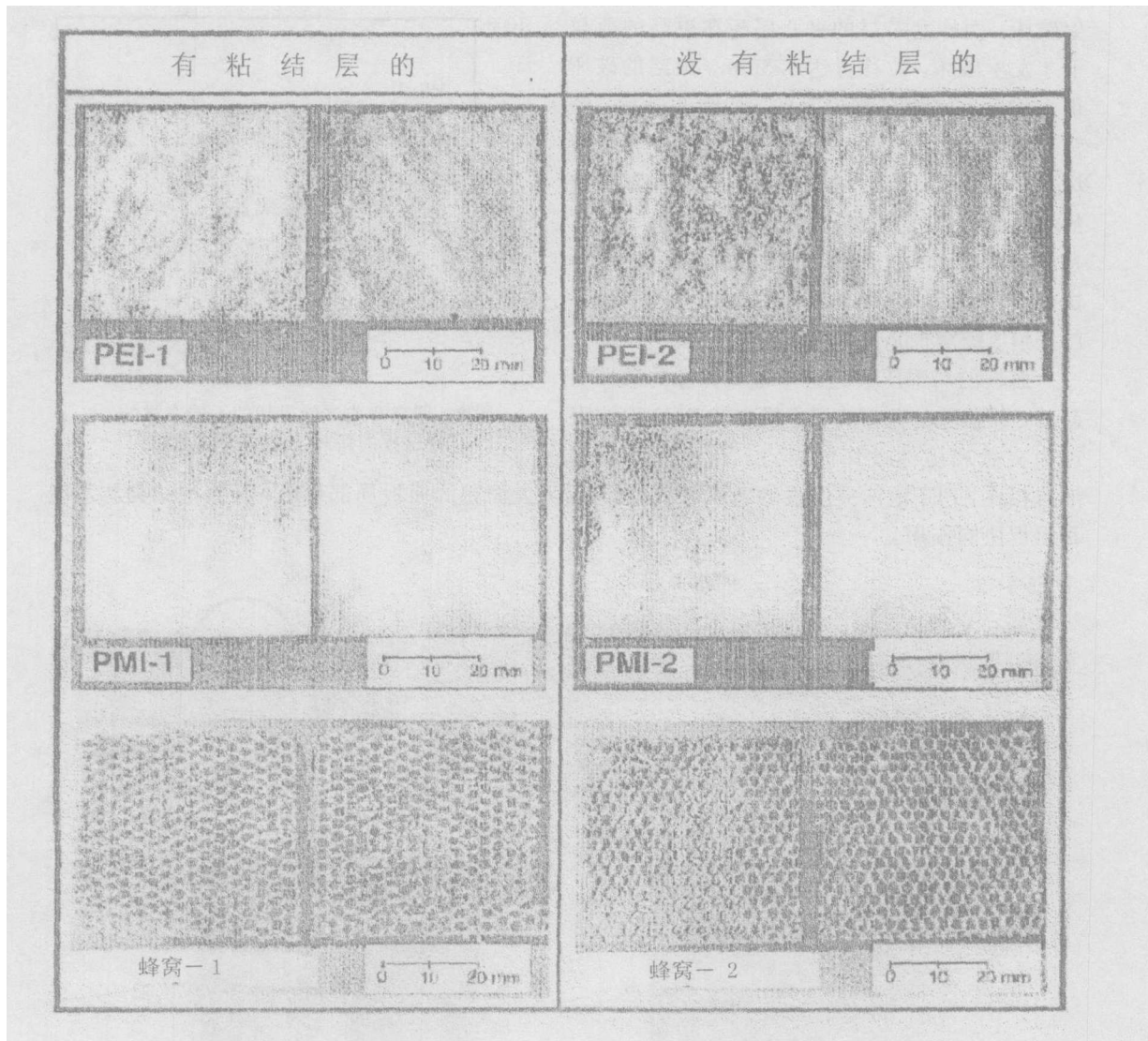


图7 在拉伸试验后夹层板的破坏情况

最大应力，但是刚度和应变却不同。因而，PEI 泡沫芯材的夹层板具有一定的柔性，较高的断裂应变值。相比较而言，PMI 芯材的夹层板的性能稍差，具有脆性破坏的特点。所有夹层板的破坏都是以夹芯材料的破坏结束。

裂缝的开始位置大多是在粘结层和夹芯材料之间的过渡区域，然后在夹芯材料中扩展。这就解释了为什么裂缝和粘结膜的使用与否无关。

3.5 四点弯曲试验

图8表示了四点弯曲试验的荷载-位移关系曲线。在位移小于3mm以前，三种夹层板的荷载-位移关系曲线形状非常的相似。面板是决定荷载-位移曲线的主要因素。

在这个荷载范围内，芯材的作用并不明显。在位移大于3mm以后，两种泡沫芯材都发

生破坏。而蜂窝芯材的夹心层板在更高的荷载下才发生破坏，位移可达 5.5mm。最终的破坏很大程度上是由芯材控制的。如图 9 所示，蜂窝芯材的破坏表现为蜂窝壁的失稳和剪切破坏。PMI 芯材夹层板的破坏是源于—根宽裂缝的不断发展，首先是在泡沫的中间位置，然后是面板平行方向，最后贯穿厚度范围。在弯曲试验结束以后，PEI 夹层板的表面会出现局部的压痕。蜂窝也是同样的现象。

面板的局部压痕是由于泡沫孔隙的破坏引起的，即孔隙的薄壁失稳。蜂窝和 PMI 泡沫表现为突然和脆性破坏的特点。和蜂窝及 PMI 泡沫相比，PEI 泡沫夹层板的破坏荷载较低，因为大面积的面板局部弯曲，导致泡沫夹芯不能和面板协同作用。

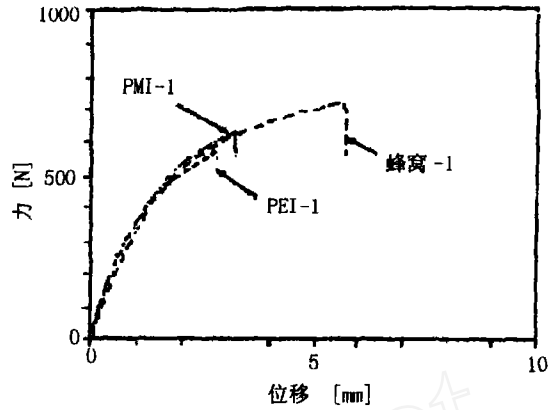


图 8 四点弯曲试验得到的不同芯材的夹层板的荷载-位移关系曲线

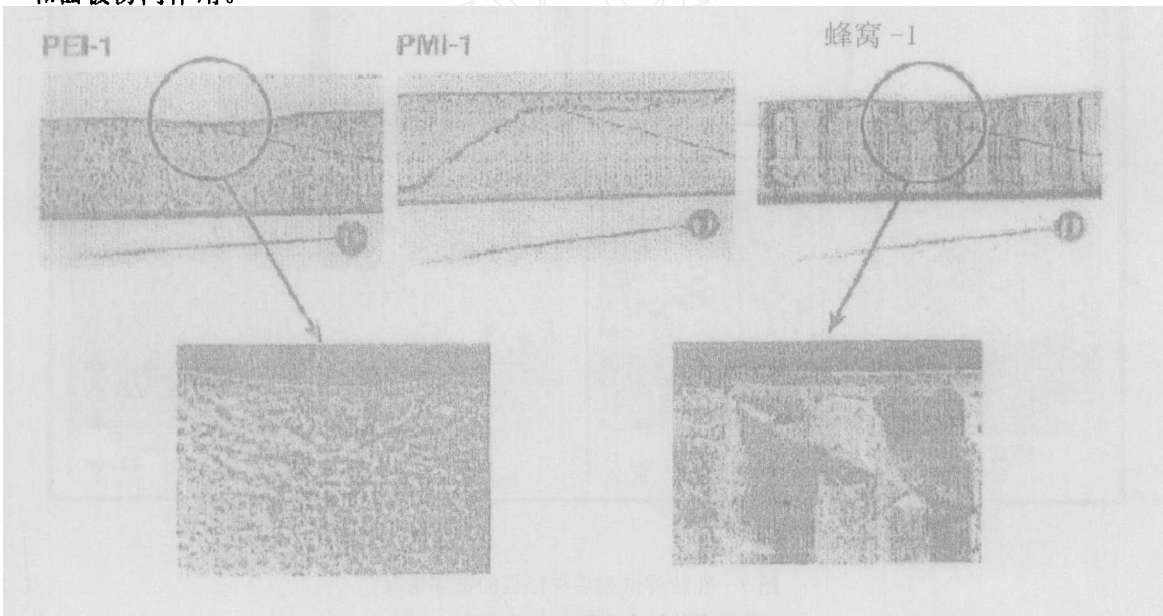


图 9 四点弯曲试验结束时的夹层板

3.6 重物冲击试验

根据前面的试验，夹芯结构的破坏形式表明：芯材性能是影响结构性能的重要因素。重物冲击试验能够表明材料的抗冲击能力或局部承载能力。试验得出重物在一定的下落速度时的荷载-时间曲线。

试验数据还包括最大荷载值和能量吸收值。图 10 是不同夹层板的荷载-时间曲线。

夹层板重物冲击试验的特征是在荷载-时间曲线上有两个峰值。第一个峰值是在重物贯穿上部面板时发生，在一定时程以后产生的第二个峰值是重物贯穿底部面板时产生的。两个峰值之间的荷载-时间关系反映了贯穿泡沫芯材过程中的能量吸收过程。

PEI 泡沫为芯材的夹层板在峰值 1 和峰值 2 处具有最大的荷载值，但是蜂窝夹层板在峰

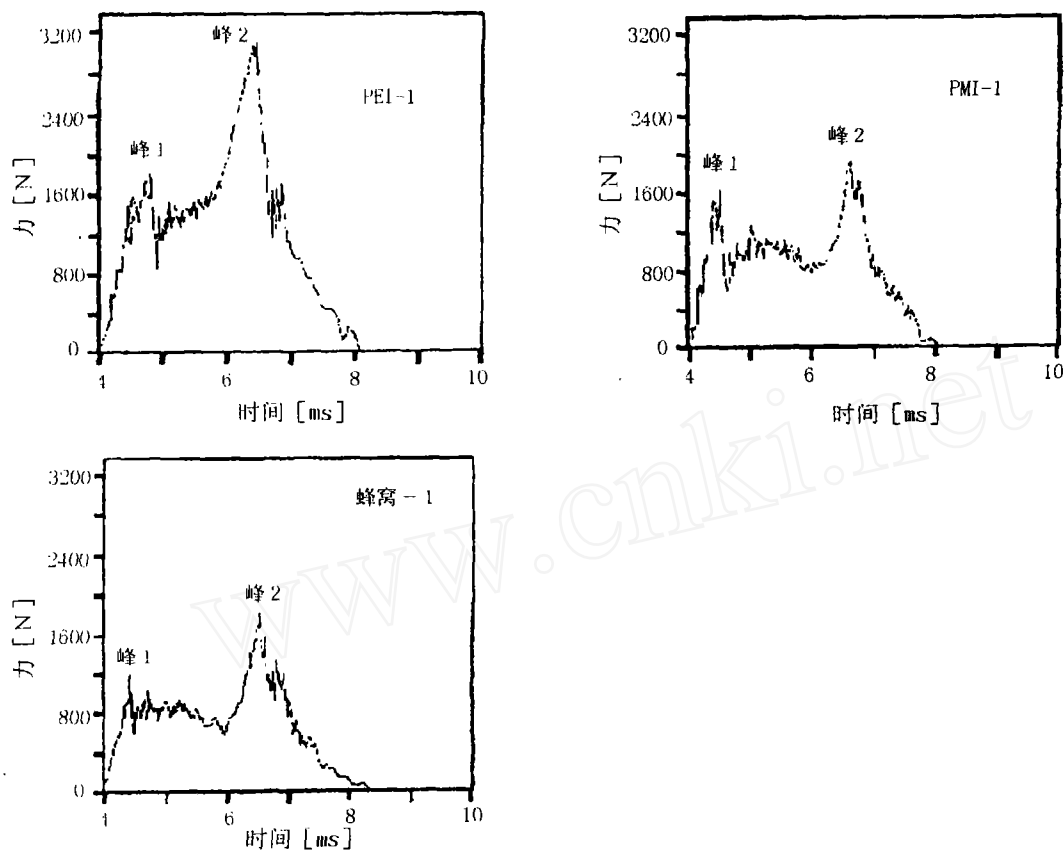


图 10 不同芯材的夹层板重物冲击试验的荷载-时间曲线

表 9 不同芯材夹心层板的能量吸收值

	W 峰值[1]	W 峰值[2]
PEI-1	4.8±0.7	23.1±1.3
PEI-2	4.4±0.0	20.1±2.9
PMI-1	2.6±0.5	16.9±0.4
PMI-2	2.5±0.5	15.9±0.4
蜂窝-1	1.6±0.2	14.0±0.6
蜂窝-2	1.7±0.2	11.9±0.3

值 1 和峰值 2 处具有最低的荷载值。这一明显的不同对聚合物泡沫在轻质夹芯结构中的应用来讲是非常重要的。在峰值 1 前的吸收能量积分也是反映冲击性能的一个重要特征。表 9 表明在峰值 1 和峰值 2 前的吸收能量积分和相对应的标准误差值。表 9 中的顺序排列正是与最大荷载的顺序相同。夹芯泡沫材料能量吸收能力的不同和微观变形能力直接相关。蜂窝芯材夹芯结构较低的能量吸收值和贯穿的重物的线路周围区域的蜂窝较低的冲击破坏能量值是相互对应的。PEI 泡沫夹芯结构较高的能量吸收值和扩展塑性变形区的各个孔隙的剪切、屈

服和塑性变形是相互对应的。可肉眼观察到的微观裂缝的出现和发展限制了 PMI 泡沫芯材的能量吸收能力。

粘结层对试验的影响和其他试验相似，非常小。只有峰值 2 的能量积分有所不同。在下面一节中我们将讨论粘结层的作用。

3.7 粘结层的作用

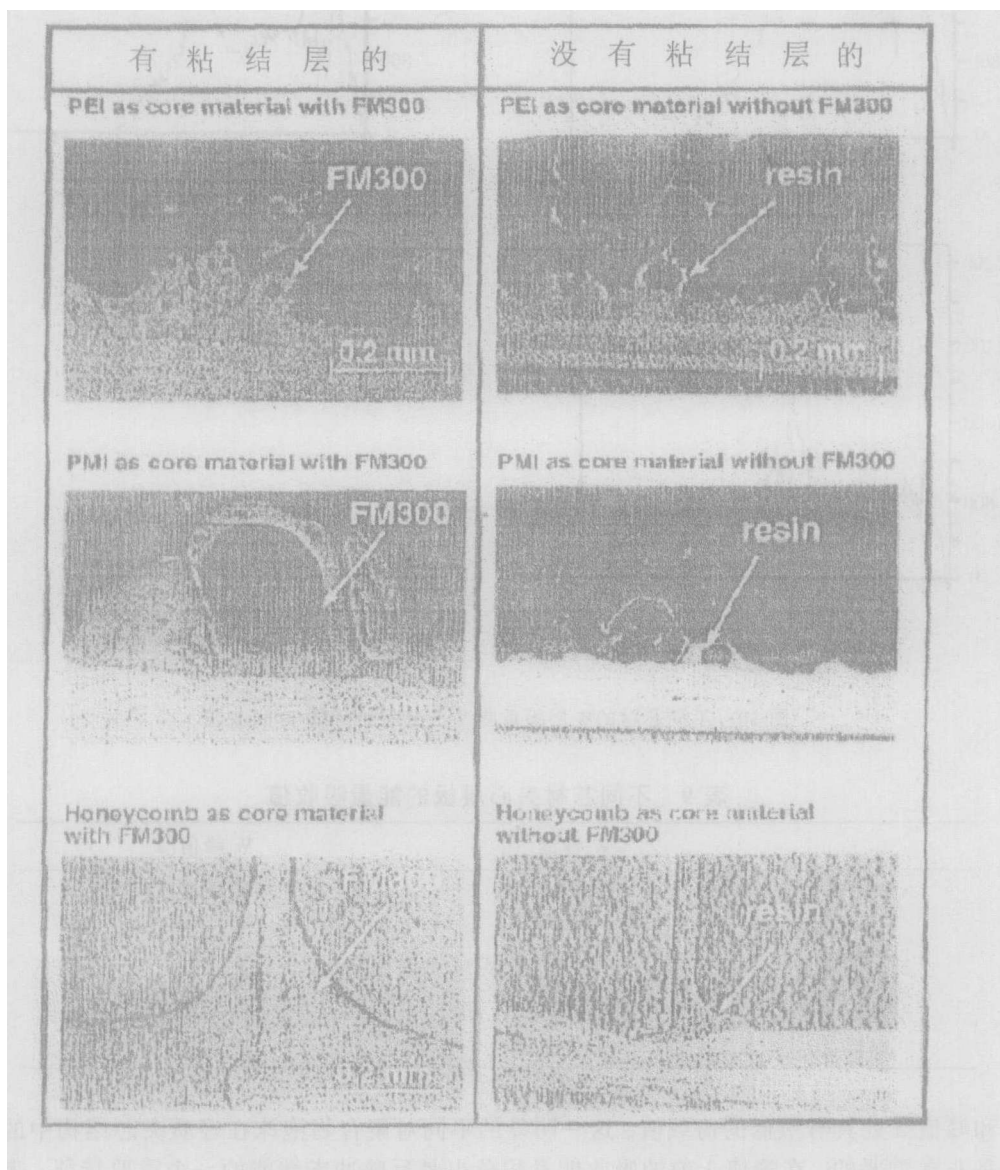


图 11

面材和各种芯材的接触区域的微观视图可参见图 11。

粘结层必须将面板和芯材牢固的粘在一起，将荷载从一个界面传递到另一界面。粘结层的形状和是否使用粘结膜有关。在没有使用粘结膜的情况下，树脂被挤出复合材料进入界面

层中,但是两种泡沫芯材之间仍然有显著的区别。对蜂窝来讲,这样形成真正的芯皮粘合。但是在没有粘结膜的时候,蜂窝的孔隙就缺少足够的支撑,因为在使用 FM300 粘结膜时的典型树脂液面没有完全形成。

对夹芯泡沫芯材而言,在面材和芯材之间的粘结层是均匀分布的。没有使用粘结膜的时候,在 PMI 泡沫芯材的试样中,粘结层的厚度非常小,而使用粘结膜的 PEI 泡沫试样的粘结层却非常厚。在 PEI 泡沫芯材中树脂的大量渗入表明在泡沫表面有大量的开孔孔隙存在。

总之,蜂窝夹层板的性能,如图 6 中的拉伸强度,比闭孔的泡沫夹层板更易受到粘结层中的树脂含量的影响。闭孔泡沫夹层板中的树脂流动仅限于靠近面层的开孔孔隙中。

4 结 论

夹层板的基本概念是面层承受弯曲荷载,芯层承受剪切荷载。按照这一概念,通过集成优化,可以以最经济的方式,最小的自重,达到最大的刚度和强度。在结构应用中,通常蜂窝最不利的地方是不菲的制造工艺,尤其是在将蜂窝加工成复杂的几何形状时。另外,还有粘结结构胶膜的使用而增加了重量,芯材中孔隙部分高吸水率,蜂窝扩展方向较低的剪切强度等不利因素。为了克服这些不利因素,越来越多地考虑使用聚合物泡沫来代替蜂窝作为夹芯材料。但是,作为替代材料也有其不利因素。本文的目的是比较在相同的固化条件下,使用不同的夹芯材料,相同的面层材料时,夹芯结构层板主要的力学性能。

和蜂窝夹芯材料相对比,在试验中发现泡沫夹芯的夹层板能量吸收较高,这是直接和微结构变形有关的。在拉伸荷载作用下,面板和芯层之间的粘结层的影响非常的小。根据对粘结线的微观研究,在没有使用粘结层,直接粘结的情况下,在固化过程中有足够的树脂能够从面层层板流入芯材表面的微观孔隙中。泡沫芯材的夹层板具有较好的表面平整度。常见的蜂窝夹层板的电报效应并未见于泡沫夹层板中。

除去上面的一些因素外,尚未有泡沫夹芯结构的疲劳性能、化学稳定性和 FST(烟雾毒性)等方面的试验资料。这些问题将在以后的文章中阐述。

5 致 谢

非常感谢戴姆勒-奔驰航空公司对该研究项目的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Gorden J. . Engineered Material Handbook Volume 1, Composites, ASM international USA;(1987) 721
- [2] Lee S. M. International Encyclopedia of Composites, VCH publishers Inc. New york, (1990)
- [3] Dean J. D. and Starlinger A. , The new sandwich composites design of the latest transrapid maglev vehicles, Proceedings of the 17th International SAMPE Europe Conference of the Society for the Advancement of material and process Engineering, Basel Switzerland (1996)
- [4] Craft J. W. Hughes D. R. and Kelkar A. D. Low velocity impact damage of organic foam core sandwich composites, eleventh international conference on composite materials, Queensland, Australia, (1997)

(胡 培编译)