

RTM 工艺中的泡沫芯材

胡 培

(德国萨太平洋有限公司上海代表处)

摘 要

为了论证泡沫芯材在 RTM 工艺中是否适用,德国宇航中心 DLR 使用 PMI 泡沫(ROHACELL)芯材,采用压力罐辅助树脂注射工艺(单管注射 Single-Line-Injection SLI 工艺)试验制造了部分结构件。其中部分样件还采用了单面缝合技术,提高了面板的抗冲击性能。另外,DLR 还研究了泡沫芯材 LRI(液体树脂注射)基础上 CFRP 机身结构的设计方案。方案具有高度集成和制造简单的特点。

在大量使用的基础上,位于德国 Braunschweig 的 INVENT 公司成功的在新近开发的仙童多尼尔 728 飞机的起落架舱门和其它的二类构件中,使用 LRI/泡沫芯的设计方案。即使高负荷、及其复杂的一类构件——前支杆转接器也是由 INVENT 公司采用这种技术制造完成。

1 夹层结构的原理

在航空结构中,高性能结构构件的一个重要课题是如何最大程度的减轻重量。这类轻质结构的主要形式是承载力和屈服能力都得到优化的壳结构。虽然夹层结构在一些应用领域已经证明其优点,但是传统上提高屈服强度的方法仍然是使用同质材料加劲肋形式。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。夹层材料的芯材承受的应力相对较小,选择轻质材料作为芯材,减轻构件的重量。

对于面材很薄的夹层结构,还需要考虑荷载的施加方式和夹层结构对冲击荷载的承载力。

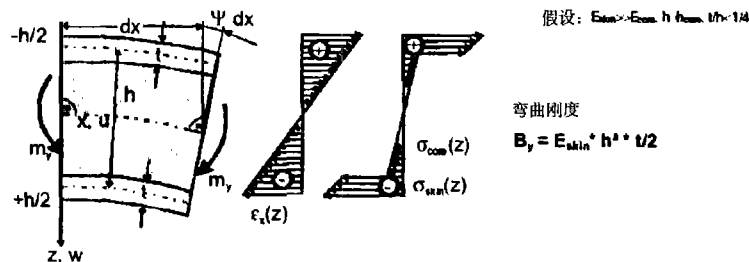


图 1 弯曲荷载下的夹层结构^[1]

这样，面板的最小厚度必须满足一定的条件。除此以外，夹层结构的使用经验还表明，在从经济方面评估夹层结构时候，还需要考虑结构的整个使用寿命。

(1) 夹心材料

对于面板，主要考虑的是材料的强度和刚度，但是对于芯材，主要目的是为了最大幅度的减轻重量。为了使面板之间能保持一定的距离的同时，能保持面板的稳定，夹心材料需要承受一定的压力。这样，夹心材料主要承受剪应力，同时还承受压力。铝蜂窝或 NOMEX 蜂窝，具有压缩模量很高，重量轻的优点。在航空领域广泛使用蜂窝夹心材料，通常和预浸料同时使用。一些常见的结构件有机翼的前缘和尾翼，起落架等舱门结构，各种整流罩。尽管蜂窝夹心结构性能上有突出的优点，但是航空公司还是在积极寻找其代替材料，因为蜂窝夹心材料在各种用途的使用过程中需要高昂的维修费用。在一些特殊的情况下，蜂窝会被进水，例如，如果面板出现裂缝、孔隙。在低温下，蜂窝孔隙中的水冰冻以后，发生膨胀，破坏邻近的蜂窝孔隙的粘结。

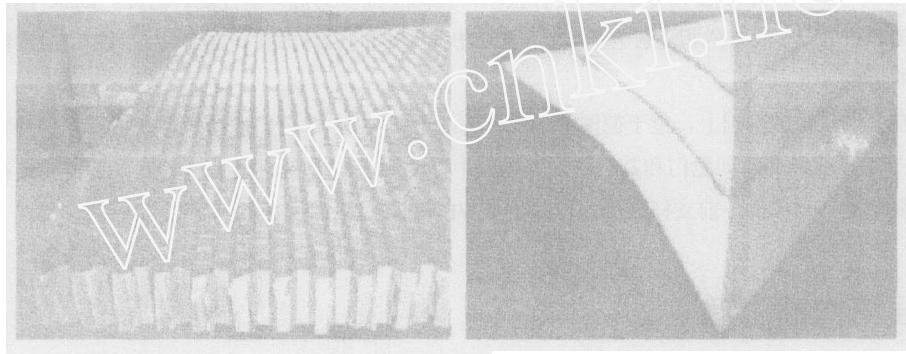


图 2 铝蜂窝和 PMI 泡沫

蜂窝芯材构件的维护需要经常的检查，因为在使用过程中往往会含有大量的水。这些蜂窝夹层构件的维护费用使得原本轻质的优点和泡沫夹心结构相比，不再存在，尽管泡沫的重量相对要重。泡沫夹心构件在构件的整个使用年限内，则更加经济。这里对各种芯材和优缺点作了一个比较。

表 1

芯材密度大约 70kg/m ³	压缩模量 MPa	剪切强度 MPa
铝蜂窝 72	1034	2.3 (L), 1.5 (W)
Nomex 蜂窝	250	2.25 (L), 1.2 (W)
PMI Rohacell®泡沫 71WF 75	105	1.3
PVC 泡沫 80	54	1.1

(2) 铝蜂窝

在重量一定的前提下，由于铝蜂窝材料的壁可以做得很薄，这样得到很高的压缩模量。但是，薄壁也会导致蜂窝的表面，尤其是蜂窝孔隙较大的情况下，发生局部的稳定破坏。另

外,铝蜂窝和碳纤维一同使用时,如果两种材料之间不做电绝缘处理,就会发生接触电腐蚀。因为对蜂窝构件内部进行检查费用很高,所以蜂窝的接触电腐蚀是一个严重的问题。通常,我们通过敲击面板来对蜂窝夹心构件的质量作一个初步的判断。因为金属蜂窝能满足严格的空间材料的气体释放要求,它们在被越来越多的使用。当然,铝蜂窝的 FST(烟雾毒性)也能满足要求。

(3) Nomex 蜂窝

Nomex 蜂窝是采用芳纶纸浸酚醛树脂制成,具有广泛的应用领域。Nomex 蜂窝和铝蜂窝相比,局部屈服的问题要小得多,因为 Nomex 蜂窝的蜂窝壁可以做得相对要厚一些。另外,因为 Nomex 材料不导电,不存在接触电腐蚀的问题。由于芳纶产品不能抵抗紫外线,Nomex 蜂窝需要有面板保护。因为材料浸渍酚醛树脂,也能满足 FST 要求。

(4) PMI 泡沫

PMI (Polymethacrylimide, 聚甲基丙烯酰亚氨) 泡沫在进行适当的高温处理后,也能承受 180℃ 的复合材料固化工艺要求,这样使得 PMI 泡沫在航空领域得到了广泛的应用。中等密度的 PMI 泡沫具有很好的压缩蠕变性能,可以在 150℃, 0.5MPa 的压力下,压力罐固化。PMI 泡沫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 泡沫是一种均匀的闭孔泡沫,孔隙大小基本一致。未经过密封保存的 PMI 泡沫在吸潮以后,重量增加大约 9% 以后,达到饱和,这会产生负面的影响。在泡沫未完全干燥的情况下,泡沫中存在的水分会在制造过程中将引发一些严重的问题。另外,在使用含有异氰酸的树脂时,泡沫中含有的水分会引起基体材料降解。PMI 泡沫也能满足 FST 要求。

(5) PVC 泡沫

PVC 泡沫的主要优点是价格相对便宜,通常用来制造小型飞机,制造工艺不需要压力罐,复合材料的固化温度低于 140℃。在使用 RTM 工艺的情况下,需要对 PVC 泡沫加热以后释放的气体给予一定的重视,因为这会导致层合面板材料内部产生孔隙。PVC 泡沫还有一个优点是吸潮率较低,另外未经过高温处理的 PVC 泡沫具有很好的抗冲击强度。

2 制造工艺

复合材料的整个方案中,除了研究夹心材料和面板材料的性能特点以外,还需要考虑材料的制造过程中的使用问题。

(1) 现状

目前,夹层结构中通常是泡沫或蜂窝和玻璃纤维或碳纤维的预浸料共同使用。和泡沫相比,蜂窝相对多一些。芯材和面板通常是采用胶膜粘结,在压力罐中和层合面板一同固化。压力罐能提供 0.6~0.3MPa 的压力,使复合材料夹层结构的各部分固化密实、牢固。蜂窝芯材的准备工作包括:外形加工,在以后安装螺栓的位置,蜂窝芯的填充。在一些特殊的情况下,切开蜂窝壁,让结构件排出渗水。由于蜂窝夹心的变形性能非常复杂,使得在弯曲时,芯材和模具之间很难完全吻合。泡沫夹心能够使用热变形模压加工外形,如果要求的误差很小,也可以使用机

机械加工出需要的外形。可以简单的将不同密度的泡沫板拼合, 适应不同的密度分布。

(2) LRI (液体树脂注射 Liquid Resin Infusion) 工艺

液体树脂注射是一种相对较新的优化制造工艺, 借助 RTM (树脂转注模) 的技术, 生产高性能夹层结构构件。目的是为了简化生产过程, 降低制造成本, 节约原材料的价格。选用价格相对较低, 具有良好的铺覆性能的布, 可以实现批量生产, 构件能达到使用高质量的预浸料的效果。如果将蜂窝的孔隙加以密封, 不让低黏度的注射树脂流入蜂窝孔隙, 在 RTM 制造过程中, 也可以选择蜂窝作为夹心材料。位于斯图加特的 DHR 已经和 VARI (真空辅助注射) 技术结合, 试验了这项技术, 取得了成功。位于德国布隆传埃德的 DHR 和位于同一个城市的 INVENT 公司相互合作, 主要从事了在压力罐辅助工艺中如何使用 PMI 泡沫芯材。

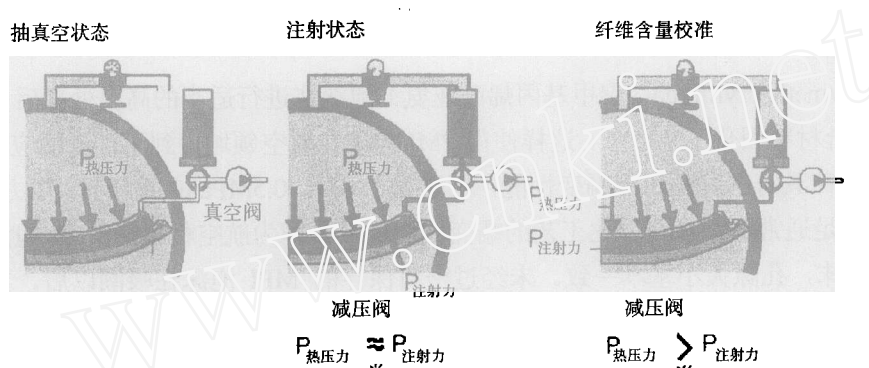


图 3 SLI (单管注射) 工艺^[2]

压力罐能够提供均匀的压力, 满足各种不同的要求, 保证构件的质量和生产的可重复性。另外, 对于存在临界蒸汽压力的树脂, 例如, polyisocyanurates (e.g. Blendur), 酚醛树脂或干布和预浸料混合使用的情况下, 都可以根据材料的参数要求在压力罐中固化。对于质量要求严格的产品, 使用压力罐的成本和不使用压力罐的成本相比, 差距不是很明显, 因为大气密度的提高, 集成的冷却系统都会缩短加热和注射过程, 因而缩短整个制造周期。另外, 购买压力罐的价格大约是烘箱的两倍, 但是这样可以在折旧过程中同时使用预浸料和 LRI 工艺, 简化了工厂的设备使用。同时, 大多数烘箱的工艺准确性和防火性和压力罐相比要差, 所以如果使用烘箱固化, 需要修改一些工艺参数。

在生产 2000 多构件的基础上, 我们得出了 SLI (单管注射) 工艺的使用经验。生产出的构件同时具备在重复生产基础上的高质量和良好的工艺可靠性的特点。使用泡沫夹心的构件包括德国 INVENT 公司为仙童丹尼尔 728 制造的新机身全尺寸设计样件, 二类构件前起落架舱门。

(3) 开发过程

自 1995 年以来, DLR 结构力学研究所一直研究, 在使用优化的纤维产品和 LRI 相互结合基础上的新型制造工艺。在研究过程中, 使用各种密度的 ROHACELL PMI 泡沫, 试制大批样件。提高泡沫夹层构件性能主要在于提高抗剪切强度、增加面板和芯材之间的粘结两个方面。

(4) 提高剪切强度

提高抗剪强度以后,才有可能将泡沫夹层构件的使用范围拓宽使用到高负载的构件中。因为高性能的 PMI 泡沫芯材只有通过增加密度来提高材料的性能,所以寻找一个途径如何将泡沫芯材和纤维增强材料相互结合就显得尤为重要。一种结构上非常有效的途径是使用 45° 的网格穿刺,网格的尺寸可以根据设计承载应力调整^[5]。在和干布同时使用时,加工好的泡沫芯材在制造过程中也能起到辅材的作用。按照要求,用布(织物、编织物等)或管带的编织物缠绕包裹泡沫芯材。一种由“von Bauer”开发的单向织物产品因为使用了一种 Lycra 的编织线,能够很好的满足要求,构造夹心结构。这种方案的优点已经在 HGF 开发的黑色机身项目设计中得到体现^[3]。

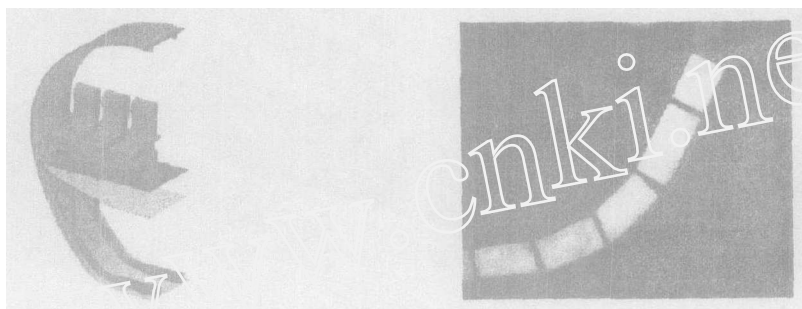


图4 HGF“黑色机身”设计演示

(5) 界面优化

良好的泡沫芯材和面材之间的界面有利于提高结构的抗冲击性能。使用 Z 方向的纤维增强来提高面材和泡沫芯之间的界面性能是一种很有效的途径。实现 Z 方向纤维增强可以采用一种灵活的单面针缝机头将缝线将面材缝入泡沫芯^[4]。在构件灌胶固化过程中,缝线被树脂浸润,然后在一定压力和温度下固化。

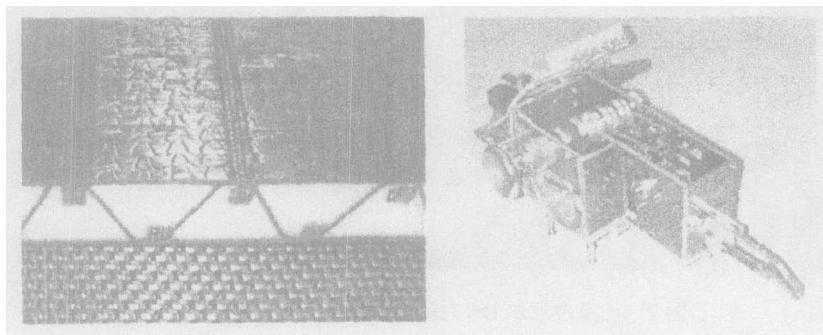


图5 缝合后的夹层构件/单面缝合机头(KSL, Lorsch)

使用了适当的针,可以在面层材料损坏不严重的前提下,借助于单面缝合技术将缝线缝合到夹层构件中。借助单面缝合机头的灵活性可以缝合复杂的形面。

(6) 系列应用

在试验结构制造实践的基础上, SLI-PMI 方案很快应用到批量制造。位于 Braunschweig 的 INVENT 公司开发了使用 SLI 技术, 批量制造夹层设计结构的工艺方案。在制造 Esa Estec 太阳帆展开舱和仙童多尼尔 Do 728 经验的基础上, INVENT 公司已经能够成为仙童多尼尔 728 的前起落架舱门和 RAT 门的合格供货商。从第一个构件的制造开始就证明使用具有良好铺覆性能的纤维织物和能精确预成形的泡沫芯材(局部密度可以调整)完全可以缩短制造时间、降低材料成本。INVENT 公司还能够开发一种非常有效的加工方案, 能够让几个构件同时灌胶, 减少了清洗成本。

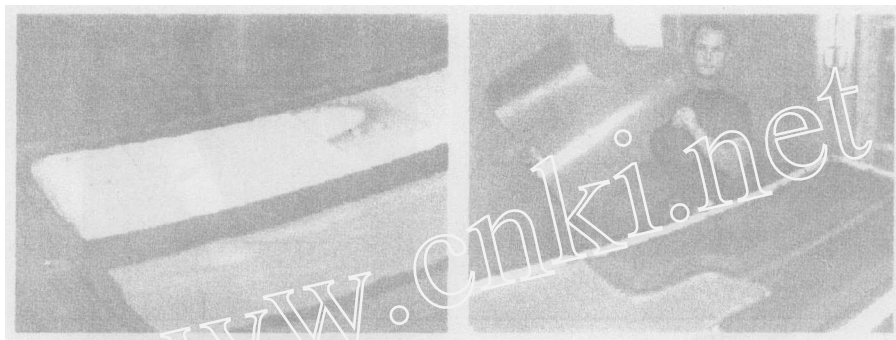


图 6 使用 PMI 泡沫芯材制造的仙童多尼尔 728 的前起落架舱门

对前起落架舱门和 RAT 门, 采用了泡沫芯设计结构构件。使用泡沫芯, 而不是蜂窝芯的决定是根据一个大型航空公司客户的要求。

另外一个使用泡沫芯作为制造辅助材料的是前支杆连结器(连结仙童多尼尔 Do 728 飞行试验需要的前支杆和前框架)。在这里, 生产实践表明如果几个预成形构件的安置相互交迭, 使用泡沫芯来简化工具制造也是有限的。



图 7 仙童多尼尔 Do 728 带有前支杆连结器的前支杆

3 结 论

在夹层结构构件中使用泡沫芯既可以降低制造成本, 也能作为结构材料。如果仅仅作为结构材料考虑, 泡沫芯夹层结构不能和泡沫芯夹层结构的设计相比, 因为在重量比方面处于劣势。但是, 如果在使用周期内作一个综合的比较, 泡沫芯夹层结构考虑到制造和维护方面

的优势, 仍然是一个比较好的选择。这也被多家航空公司所认同。除此以外, 这里举出的例子也清楚的表明使用液体树脂注射技术, 特别是单管注射技术可以在制造过程中降低成本、简化操作。新的泡沫夹层结构设计, 例如杆件设计或面材缝合设计也能提高结构构件的性能。

参 考 文 献

- 1 Book: B. Klein, Leichtbau-Konstruktion (Lightweight Design), vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- 2 Book: C. H. Sigle, Ein Beitrag zur kostenoptimierten Herstellung von großflächigen Hochleistungsverbundbauteilen (A Contribution to Optimised-Cost Manufacturing of Large-Surface High-Performance Compound Component Parts), Ph.D.thesis, DLR Braunschweig, 1998.
- 3 Conference: A.S. Herrmann B.Kolesnikov, A. Pabsch, M. Piening Konzepte für CFK-Rumpfbauweisen zukünftiger Passagierflugzeuge, Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress, 2001.
- 4 Conference: C. Sickinger, A. S. Herrmann, H. Wilmes Strukturelles Neben-Eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungsverbundstrukturen, Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress, 2000.

汽车制造商偏爱夹层结构地板

轻量化复合材料夹层结构正在 Audi A4 和 Daimler Chrysler E Class 旅游车车箱地板应用中替代木材。

该承载的刚性结构地板是用 Baypreg®F 聚氨酯树脂和 Bayer Polymers AG 公司提供的连续玻璃纤维毡作蒙皮和一层纸蜂窝芯制成。用一简单的压力成型工艺模塑该结构件。据 Bayer 公司介绍, 该部件的重量比木材和钢材相应产品大大降低, 将有助于降低动力车燃料的消耗。

参与了 Bayer 公司轻量化复合材料开发工作的 Reiner Paul 先生介绍说: “用 Baypreg F 材料, 我们可以制得重量在 2.2kg/m^2 的高受力夹层结构构件。它们在同样刚度情况下, 和传统材料相比, 重量减轻 1/3。这些复合材料的其他优点是耐热性和尺寸稳定性好, 且更不必说 Baypreg F 夹层结构提供的可设计性的优点。”

要制成地板结构件, 先将纸蜂窝“外封”, 并用液态 Baypreg F 反应混合物浸润的两层连续玻璃纤维毡铺放在芯材的两面, 将模具预热到 $95\sim 140^\circ\text{C}$, 然后压力成型。同时, 必须及时起模取出部件, 压制时间小于 90 秒。该成型工艺可以制造带有突变板壁厚度变化的稍复杂部件和精确边缘外形结构部件, Bayer 公司解释, 定位装置和加强元件也可以预埋在成型部件中。

Bayer 公司说生产的 Daimler Chrysler 车地板尺寸为 $920\text{mm}\times 865\text{mm}$, 重量 4kg 以下, 具有一些斜切边缘和凹槽, 地板 16mm 厚, 仅被架在车身内壁边缘上, 可承重 320kg。Audi A4 的地板稍小些, $725\text{mm}\times 685\text{mm}$, 厚度 7mm, 总重量才 740g。

Bayer 公司说, 使用复合材料夹层结构和压力模塑成型意味着不需二次加工和机加工。现在该地板正以年产率 300000 件生产。

(《RP》, 2003, 6)