



SOLVAY
asking more from chemistry®

Radel® R-1050 PPSU 结构性泡沫

设计及加工指南

R-1050 可热成形泡沫由基于Radel® 聚亚苯基砜 (PPSU) 的材料制成, 适用于结构件。20多年来, 这种超高韧性聚合物一直被用作飞机内饰, 可以有效防止由于冲击造成的非可控裂纹延展。

通过采用独有挤出技术, Radel® PPSU泡沫材料可以生产出密度范围为45 kg/m³ ~ 200 kg/m³ (2.8 lb/ft³ ~ 7.5 lb/ft³) 的泡沫。Radel® R-1050的密度为50 kg/m³ (3.12 lb/ft³)。具体信息, 请参考我们的《隔音结构件用Radel® R-1050 PPSU可成形泡沫》技术手册。

主要特性

- 在高达180 °C (356 °F) 时仍可保持机械性能
- 加工过程中吸湿量和浸胶量最低 (开孔率只有7 %)
- 能耐受Skydrol® 和其它航空工作液
- 出色的阻燃、低烟和低毒性 (FST) 性能
- (与蜂窝结构相比) 闭孔形态, 无需进行边缘填充
- 可热成形, 回弹或收缩量最低
- 易于加工、维修和回收
- 不易碎、无脆性

表1: 不同芯材的性能对比

芯材 ⁽¹⁾	机械性能	隔音性能	损伤容限	维修便利性	特性	可加工性 (可成形性)	耐水性 (1=最佳)
PPSU 泡沫	0	0+	0+	0+	0+	0+	1
PESU 泡沫	0	0+	0	0+	0+	0	2
PEI 泡沫	0	0	0+	0+	0+	0	3
PMI 泡沫	0+	0+	—	—	0	0	4
蜂窝结构	+	None	0	—	0+	—	4

平均值 = 0; 高于平均值 = +; 略高于平均值 = 0+; 低于平均值 = —

⁽¹⁾ PESU = 聚醚砜; PEI = 聚醚酰亚胺; PMI = 聚甲基丙烯酸酯

三明治夹芯板结构设计考虑要点

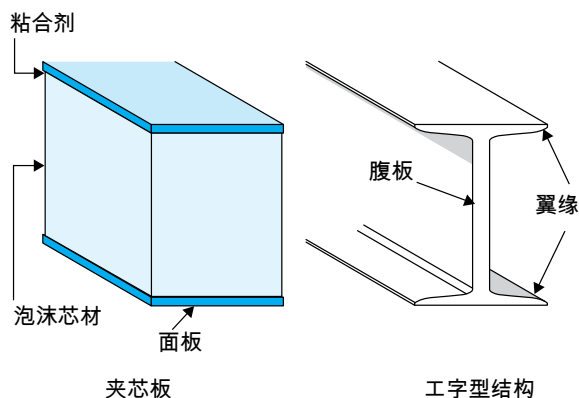
工字型

芯材/三明治层压复合材料的结构优势, 可以通过绘制一个工字型构件图 (图1) 来描述, 其中工字型构件的翼缘能抵抗外加荷载带来的弯曲应力, 工字型构件的腹板可抵抗剪切载荷, 从而提高了工字型构件的刚度 (抗变形能力)。因此, 这种具备了承重能力的工字型构件可作为切实有用的高效结构件。

与此类似, 芯材/三明治层压结构中的复合面板如同工字型构件中的翼缘一样, 也可以抵抗由外加载荷带来的弯曲应力。而芯材就如同工字型构件中的腹板, 能够抵抗剪切载荷, 从而提高了系统的刚度。

在三明治夹芯层压板结构中, 芯材所提供的大面积的连续支持, 超出了工字型构件中腹板的非常有限的局部支撑, 从而比工字型构件更具各向同性的特性。并且在提高机械性能的同时, 系统重量增加极少。

图1: 夹芯板结构与工字型结构的比较



夹芯复合材料设计指南

有关夹芯板复合材料部件设计的基本概念在一些出版物中有详细描述, 包括:

- 复合材料手册, 编辑: George Lubin, Van Nostrand Reinhold, 纽约, 1982年, 第557~601页
- 夹芯结构手册, 编辑: D. Zenkert, 工程材料咨询服务有限公司 (EMAS), 1997年。

主要关注点

- 明确外加载荷和复合夹芯材料所需的刚度, 以及相关热性能和环境要求
- 定义所要使用的夹芯结构和材料类型
 - 复合面板结构 (增强类型、基体树脂、铺叠的几何形状等) 及相关材料特性
 - 夹芯中的芯材 (泡沫、蜂窝、轻质木材等), 厚度及相关材料特性
 - 芯材与面板间可能采用的粘合系统 (面层的基材有可能提供足够的粘合力)
- 确定重要的边界条件以及物理和环境限制, 确保这些问题在设计过程中得到解决
- 进行优化计算以实现复合构件所需的性能

泡沫加工

可通过以下机械手段, 将Radel® PPSU泡沫材料制成芯材和结构部件:

- 高压水射流切割
- 利刃切割
- 板锯或带锯
- 刮削成薄规格泡沫
- 用简单的金属钻头钻孔
- 使用轨道式、带式或鼓式打磨机打磨, 打磨等级为 #80~#300
- 焊接 (热板技术)

热成型

不带面板的Radel® PPSU泡沫可以真空袋热成型加工, 将未经加热的泡沫板和模具插入真空袋, 然后, 将该组件 (含泡沫板和模具的真空袋) 放置在一个温度控制在190 °C~200 °C (374 °F~392 °F) 的烘箱中。

一旦真空袋组件在烘箱中达到设定温度, 即对系统进行抽真空, 并保持几分钟。随后, 将组件从烘箱中取出, 在真空 (图2) 状态下冷却至120 °C (248 °F) 以下, 即可脱离真空状态, 并将泡沫构件从真空袋和模具 (图3) 中移出。

图2: 热成型真空袋

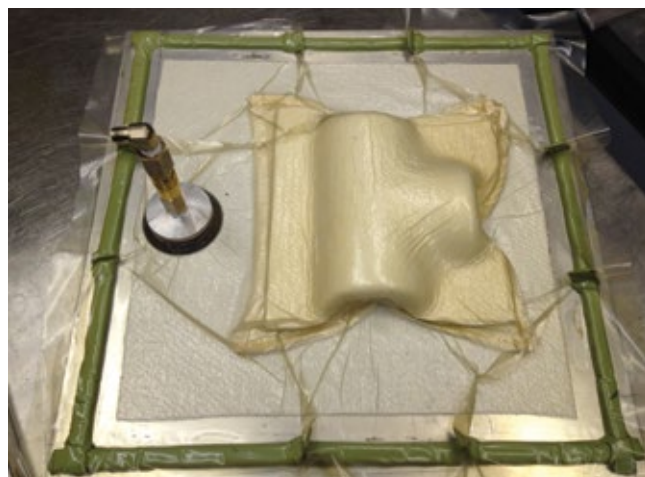


图3: PPSU泡沫可以热成型加工成带有曲线和转角形状



带面板的Radel® PPSU泡沫可使用配模加工热成型。首先, 将泡沫和面板放置于190 °C至200 °C (374 °F~392 °F) 的烘箱中进行预热, 然后, 将泡沫和面板转移到预热温度约为220 °C (428 °F) 的配模中, 以补偿泡沫转移中产生的热损失。闭合模具进行冷却。当温度降至120 °C (248 °F) 以下时, 立即打开模具, 取出泡沫构件 (参照图4)。

采用有限元分析 (FEA) 计算方法模拟PPSU泡沫真空袋热成型。在这些计算中, 我们假定泡沫在200 °C (392 °F) 温度条件下呈均匀状态, 如图5所示。

根据PPSU应力 - 应变曲线, 在泡沫板上施加压力 (最大为1 bar), PPSU应力 - 应变曲线提供了出现破坏的一条简明判据, 即应变低于25 %。当应变达到或超过25 %, 泡沫即可能失效、崩溃。图6为FEA计算示例, 对应结果 (应变分布) 如图7所示。

图4：配模热成型



图5：Radel® R-5000在200 °C (392 °F) 下的应力 - 应变曲线

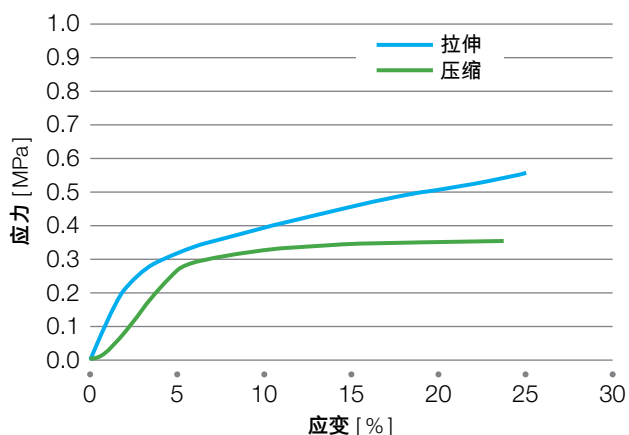


图6：FEA模拟PPSU泡沫板热成形 (r = 曲率半径)

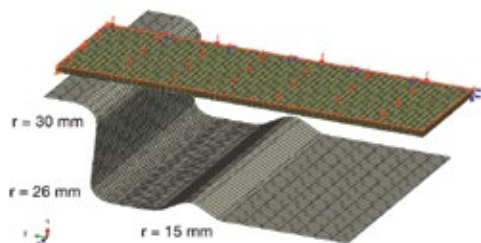
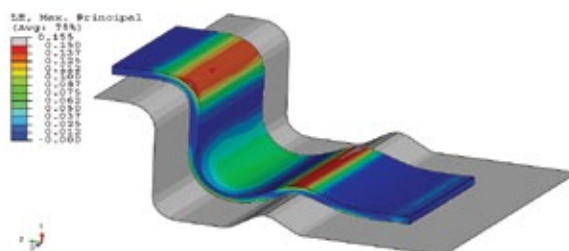


图7：FEA模拟PPSU泡沫热成形应变分布状况



主要关注点

- 应综合考虑HDT (热变形温度) 附近和超出 T_g (玻璃化转变温度) 时模量减小及延展性增大之间的平衡
- 泡沫表面温度必须能够保持, 这样拉出时表面没有裂纹
- 应控制模具温度或对泡沫进行隔热
- 应平稳地进行抽真空
- 冷却到位可限制回弹量 (模具冷却充分的情况下, 未观测到回弹)
- 在200 °C (392 °F) 以下时, 收缩率<1 %, 且能够保持均一厚度
- 温度超过220 °C (428 °F) 时, 观测到泡沫塌陷

装配

泡沫与面板的粘合

可以采用以下多种处理手段, 将PPSU泡沫粘合到面板上。

热粘合

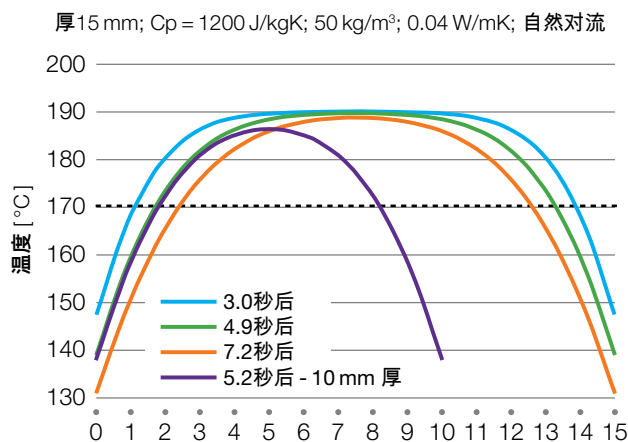
热粘合是将泡沫粘合到其它基材上的一种简单易行的方法。由于泡沫的隔热特性, 泡沫与泡沫间的粘合可能会比较困难。下面举例说明PPSU泡沫的隔热特性。比较分析加热和冷却PPSU泡沫部分与固态PPSU部分, 即可得出以下关键点:

PPSU泡沫的导热系数比固态PPSU聚合物低约10倍。

- PPSU泡沫的密度比固态PPSU聚合物低约20倍。
- 这些导热性和密度上的差异, 导致PPSU泡沫的热扩散速率比固态PPSU聚合物高2倍。
- PPSU泡沫的热扩散系数高, 意味着PPSU泡沫温度的升高与降低要比类似体积的固态PPSU聚合物快很多。

如图8所示为10 mm 及15 mm厚的泡沫, 在经历3秒、5秒和7秒自然冷却后的温度曲线。

图8：FEA模拟10 mm及15 mm厚泡沫均匀加热至190 °C (374 °F) 后的自由冷却温度曲线



对于15mm厚泡沫来说,从烘箱中取出5秒钟后,25 %厚度部分的温度已经低于170 °C (338 °F);对于10mm厚的泡沫来说,35 %的厚度已经低于170 °C (338 °F)。如果在热成形过程中自由冷却5秒后对泡沫施加一个弯曲应变,且冷却过程中继续保持这种弯曲应变,一旦释放,即可观察到很强的弹性回复。发生这种“回弹”,是因为泡沫在发生弯曲应变之前早已冷却到其成形温度以下。

然而,也可选择适当的对焊设备,将相邻的泡沫面板连接起来。必须很好地控制对焊设备的温度,以保证聚合物具有必要的流动性,同时不会造成泡沫完全塌陷。可采用特殊涂层的热刀片,在320 °C (608 °F)的条件下,对两个泡沫件进行热板焊接或接触焊接。接合压力应远低于泡沫的压缩强度,如,小于90 psi (0.62 MPa)。

也可以使用低温聚合物进行热粘合,如由聚碳酸酯(PC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)和乙烯醋酸乙烯酯(EVA)制成的很薄的聚合物膜等。采用Bostik等公司生产的聚酯制成的商用织物粘合剂,可粘结出坚固的夹芯结构。这些粘合剂能否成功应用,在很大程度上取决于泡沫所要粘接的基材的化学特性。通常,这些粘合剂会造成很多泡沫软化;而R-1050泡沫可在较低温度下使用这些粘合剂,如可以在150 °C~180 °C (302 °F~356 °F)温度范围内粘接这些材料。需留意聚合物膜的软化温度,并认真遵循制造商有关织物粘合剂的使用说明。

PPSU泡沫板材焊接

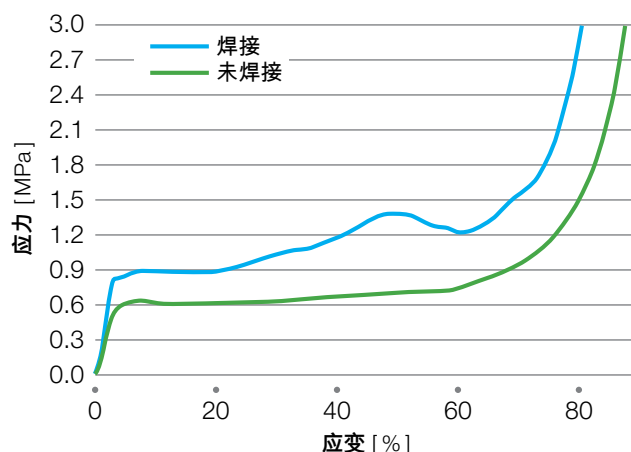
按照以下指导意见,可以简单方便地采用热板焊接技术焊接PPSU泡沫:

- 刀具温度应在300 °C ~ 330 °C (572 °F~626 °F)之间
- 需要使用特殊涂层以免发生粘连
- 优化焊接条件,以获得优异的焊接强度(图9和图10)
- 沿焊缝线刚度会略有增加;由于焊缝厚度小于1毫米(0.04 in.),因此这种现象只在很小的局部产生。
- 焊珠可以控制的很小

图9: R-1050 PPSU泡沫对焊强度



图10: 对焊与未对焊R-1050泡沫的抗压强度对比。试样大小: 30 × 30 × 15 mm (1.2 × 1.2 × 0.6 in.); 测试温度: 20 °C (68 °F)。



推荐粘合剂

常规粘合剂也可用于聚合物泡沫粘接。由于许多粘合剂都含有复杂及特有成分,因此,通常建议向粘合剂供应商进行咨询。

选择粘合方式时,有几点应加以考虑:成品的最终使用温度,可能会要求粘合剂能在高温下长时间工作;在考察各种粘合剂的粘接强度时,还应该将成品部件可能经受的应力考虑进去;接合点的设计也十分关键,本手册稍后将加以讨论。

工作温度和固化温度必须与R-1050泡沫以及与泡沫粘接的各种基材或面板相适应。很多情况下应依据基材或其它粘合面板来选择粘合剂。必须考虑基材与泡沫之间的化学相容性。

用于将PPSU泡沫粘接 to 面板材料上的常用粘合剂规格包括但不限于以下几种:

合适的粘合剂

- 环氧树脂类
- 酚类
- 聚氨酯类
- 聚酯类
- 乙烯基类
- 丙烯酸类

由于可能会导致泡沫溶化,应避免使用某些类别的粘合剂和粘合剂前体,这些包括但不限于下面几种:

应避免使用的粘合剂

- 丙烯酸酯类
- 甲基丙烯酸甲酯类
- 配方中会对PPSU产生侵蚀的溶剂(酮类和氯化烃)
- 某些胺类硬化剂或固化剂(如RTM6)

相互粘合PPSU泡沫时，一些粘合剂提供的粘合强度会超过泡沫本身的抗拉强度。应遵循制造商提供的关于使用场合、固化温度和压力等相关说明。粘合PPSU泡沫与其它基材时，应考虑泡沫和基材的粘合相容性。建议的粘合剂包括但不限于以下几种：

3M Scotchweld™

- 9323 A/B, 9323-2 A/B
- DP 8005
- DP 8010
- DP 460
- DP 490

Lord™

- 7545 A/B
- 7542 A/B

复合PPSU泡沫芯材

在许多情况下，泡沫被用作复合或夹芯结构的芯材。简单复合结构可通过热粘合或常规的湿性、薄膜或织物粘合剂来制备。一般复合结构则可采用真空成形、冲压及其它方法。

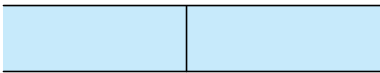
复合结构成形时，应考虑最终应用的要求。由于PPSU是一种热塑性塑料，可用来制备各种热塑性复合结构。需要了解的是，在后续处理如热成形时，泡沫和面板的工艺窗口可能互不相容。在这种情况下，需要进行多个工艺步骤，才能确保材料成形坚固，保持复合结构的机械性能。

这类复合结构的实例之一，是依据AIMS 05-10-002标准，在PPSU泡沫芯材上粘接玻纤填充酚醛面板。PPSU泡沫还被成功地粘接在Cetex™ 预浸料（玻璃纤维填充PEI条带）、碳纤维/PESU预浸料，以及Aonix公司的UltraMaterials™ 预浸料上。

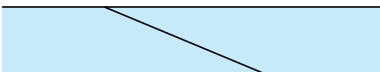
粘接PPSU泡沫板

人们之所以粘接泡沫，通常是为了增加泡沫板的厚度或宽度。图11列出了几种结合方式。这些工艺可以利用上述原则。按照客户要求定制板材尺寸和形状的能力也十分重要。同时需要注意的是，使用粘合剂将会增加最终泡沫制成品的重量。

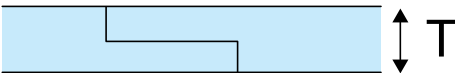
图11：各种横向结合形式



a) 90° 对接



b) 斜角搭接*



c) 阶梯式搭接*

*接头搭接长度为厚度的3倍 (t)

竖向结合时，应注意避免将气泡封闭在板材中，因为气泡会导致性能缺陷。可根据制造商的建议来确定粘合剂的厚度，然后固化。这种情况下，利用湿性粘合剂最为简便。由于泡沫材料的隔热特性，若使用薄膜和织物粘结剂需要长时间的热固化处理。

横向结合时，则需要注意设计和粘合剂的选择。接头的选择取决于应力或荷载作用的情况。尽可能保持接头表面与荷载或拉力作用的方向平行，以最大限度地提高接头的强度。粘合剂的选择也应根据接头设计来确定，因为复杂的接头可能不允许使用织物或薄膜粘合剂。

下面是一个使用双组分环氧树脂的横向接头案例：

- 90° 对焊几何形状
- Araldite® AV138和固化剂HV998
- 在110 °C (230 °F) 下固化，时间为20分钟
- 胶结系统（界面粘合与本体内部键）的抗弯强度高于泡沫自身强度

PPSU泡沫与灌注树脂的相容性

我们对RADEL® PPSU与RTM树脂传递模塑树脂的相容性进行了评估。PPSU泡沫与树脂配方的相容性取决于固化温度和树脂的化学组成。含胺类固化剂的树脂系统可能对PPSU泡沫具有侵蚀性，而需在加压状态下进行高温固化的树脂系统，可能会导致泡沫的变形。

采用赫氏 (Hexcel) 公司VRM- 34 灌注系统的测试流程

- 按100 : 42的比例对VRM 34环氧树脂和固化剂分别进行混合
- 从泡沫上切割试样。尺寸：13 × 13 × 13 mm (0.5 × 0.5 × 0.5 in.)
- 立方体泡沫试样浸泡在装有VRM 34混合物的小瓶中，然后在70 °C (158 °F) 的烘箱中放置24小时
- 将试样切成两半，评估环氧树脂的渗透情况

测试结果

- 泡沫未溶化于VRM 34体系
- 渗透范围为0.1 mm ~ 1.0 mm (4mils ~ 40mils)

用FEA技术进行结构对比

可以使用有限元分析 (FEA) 对厚度相同的Radel® R-1050 PPSU 泡沫芯材夹心结构复合材料和Nomex® Honeycomb 芯材夹芯结构复合材料进行分析，从而可以比较两种复合材料的变形。

假定复合材料的表层为0.5mm厚的铝材，芯材为25.4 mm (1.0 in.) 厚的泡沫，受测试样长为2 m (6.6 ft)、宽为0.5m (1.6 ft)，测试时两端夹紧，在梁的中线上施加大小为1500 N (337 lbf) 的力。

FEA有限元分析过程中所使用的材料性能如表2所示。铝材面板弹性模量为70,000 N/mm²。

表2: 室温下的材料特性

变量	单位	Radel® R-1050 泡沫	Nomex® 蜂窝材料
E ₁	N/mm ²	25	25
E ₂	N/mm ²	25	25
V ₁₂		0.39	0.30
G ₁₂	N/mm ²	9	1
G ₁₃	N/mm ²	9	30
G ₂₃	N/mm ²	9	30
ρ	kg/m ³	50	48

FEA模型

为了节约计算时间,仅对一半模型进行计算,模型的左侧固定,对称面上施加对称约束。对称面的边线上施加1500N大小的力。

网格采用复合壳体单元,并把材料属性和厚度属性赋予各自的壳单元。

FEA分析结果

计算得到的变形云图表明,正如预期的那样,最大位移发生在整个模型的中间部位(即受力位置)。采用Radel® R-1050 PPSU泡沫作为芯材的复合材料的最大位移为14.9 mm (0.59 in.);而采用Nomex® Honeycomb蜂窝结构作为芯材的复合材料的最大位移为11.4 mm (0.45 in.)。因此,在复合材料结构完全相同(壳层厚度和芯层厚度均相同)的情况下,采用R-1050泡沫作为芯材的复合材料的变形量比采用Nomex® Honeycomb蜂窝结构作为芯材的复合材料的变形量高21%。为了达到与Nomex® Honeycomb蜂窝结构芯材相同的变形量,R-1050泡沫芯材的厚度则需要增大到31 mm (1.2 in.)。

常见问题

什么是芯材/夹芯层压复合结构?

夹芯层压复合结构含有轻质芯材,被夹在由纤维增强复合材料制造的薄面板之间。通常,轻质芯材具有多孔结构,可以由许多种轻质材料如轻质木材、金属箔或阻燃纸制成的蜂窝状材料,以及用发泡剂制备的聚合物泡沫制成。纤维增强复合材料薄面板通常由碳纤维、玻璃纤维或其它增强纤维的热固性或热塑性聚合物基材构成。

复合结构设计师为什么青睐芯材/夹芯层压板结构?

芯材/夹芯层压结构是一项有效且高效的技术手段,与非夹芯结构相比,可以在尽可能少地增加重量的情况下,大幅提高层压复合材料的刚度(抗翘曲)。

刚度(抗变形)增大的好处如图1所示。增加面板厚度,可大幅提高芯材的刚度和抗弯强度,而重量只略有增加。

比起非夹芯结构复合材料,夹芯复合材料还具有阻隔性能的优势,能显著减少热量和(或)声音的传输。夹芯板可设计为 Helmholtz 谐振器,在噪声消减设备中调整到特定的频率范围。何种材料适用于夹芯结构芯材?

可在夹芯复合结构中使用的芯材,包括轻质木材、用金属箔、阻燃纸制成的蜂窝状材料以及聚合物泡沫。

轻质木材一般是指具有60%开放细胞孔的纤维质材料。蜂窝状材料则一般采用酚醛聚合物涂层的铝箔或阻燃纸(Nomex® 或Kevlar®)制成。

聚合物泡沫包含的材料类型十分广泛,从烯烃聚合物如聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚氨酯(PU)和聚丙烯腈(SAN),到性能更高的工程聚合物,如聚醚砜(PESU)、聚醚酰亚胺(PEI)、聚甲基丙烯酸酯(PMI),以及现在的聚亚苯基砜(PPSU)。

聚合物泡沫中裹入了很多气穴,从而形成了一种空隙丰富的材料。裹入的气体体积通常非常大,形成的薄壁聚合物膜能够将裹入的气体分隔在一个个小的气穴内。聚合物泡沫可分为开孔和闭孔类。

开孔泡沫由相互连接的气穴(气孔)组成,流体(气体或液体)可以在其中方便地流动。开孔聚合物泡沫往往相对较软,机械性能较差,容易变形。然而,由于它们的密度极低,可以作为很好的隔热和隔音材料。

闭孔泡沫则包含了相互分离的气穴。气穴互不相连,各自被薄壁的聚合物完全包围。这使得闭孔泡沫具有对流体天然阻隔性能,流体无法在气穴之间流动。闭孔泡沫通常具有比开孔泡沫更高的机械性能(抗拉强度和抗压强度),使它们更适合作为芯材/夹芯结构的结构性材料。然而,它们往往比开孔泡沫更为致密,因而其隔音、隔热性能比较有限。

www.solvay.com

SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com | 欧洲、中东和非洲

SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com | 美洲

SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com | 亚洲和澳洲

发送电子邮件或者联系您的销售代表,均可获取相应的安全数据表(SDS)。在使用我公司的任何产品之前,请您务必参考相应的安全数据表。

苏威特种聚合物公司及其子公司对于与该产品或该产品有关的信息或产品的使用,包括适销性或适用性,均不承担任何何保证,无论是明示或者是暗示的,或者接受任何责任义务。某些适用法律、法规,或者国家/国际标准,在某些情况下,根据苏威的建议,对苏威产品的应用领域进行规范或者限制,包括食品/饲料、水处理、医疗、制药以及个人护理等方面的应用。只有指定作为Solviva®的生物材料类的产品才可用作植入式医疗器械的备选产品。产品用户必须最终确认任何信息或者材料在拟用于任何方面时是否适用,是否符合相关法律的规定,使用方式是否得当,以及是否侵犯了任何专利权。本信息和产品供专业技术人员酌情使用,并自行承担相关风险,并且与该产品结合任何其他物质或者任何其他工艺的使用无关。本文件未授予使用任何专利或者其他任何所有权的许可。

所有的商标或者注册商标均归属于组成苏威集团的各公司或者各所有者拥有。© 2014, 苏威特种聚合物版权所有。D 02/2013 | R 09/2013 | 版本 1.1