

泡沫塑料夹层 结构

[苏联] A. Я. 亚历山大洛夫、
M. Я. 鲍罗金、B. B. 巴甫洛夫著



国防工业出版社

泡沫塑料夹层结构

A. Я. 亚历山大洛夫

M. Я. 鮑 罗 金 著

B. B. 巴 甫 洛 夫

徐慎礼 馮子貴 譯
兰芝芳 朱英发

周 国 怀 校



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

本书根据苏联国防工业出版社1962年出版的“泡沫塑料夹层结构”一书译出。

书中阐述了泡沫塑料夹层结构的工作特点及其设计、制造、计算和强度试验等方法。还叙述了关于泡沫塑料的一般概念及其物理机械性能。

本书可供工程计算、设计、工艺等人员及高等院校学生参考。

本书在翻译过程中由胡建国、李声远同志作了技术方面的校对。

КОНСТРУКЦИИ С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ ПЕНОПЛАСТОВ

〔苏联〕 А. Я. Александров,
М. Я. Бородин, В. В. Павлов
ОБОРОНГИЗ 1962

泡 沫 塑 料 夹 层 结 构

徐慎礼 冯子贵 译
兰芝芳 朱英发

周 国 怀 校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

人民卫生出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 $5\frac{13}{16}$ 145 千字

1965 年 9 月第一版 1965 年 9 月第一次印刷 印数：0,001—2,040册

统一书号：15034·972 定价：(科七) 1.00元

目 录

引言	5
主要符号	9

第一章 泡沫塑料

第一节 概述	13
1. 泡沫塑料的结构	13
2. 泡沫塑料的制造方法及工艺原理	14
3. 泡沫塑料的泡沫分散度和体积重量	29
4. 泡沫塑料的一般特性	32
第二节 泡沫塑料的主要性能	32
1. 泡沫塑料的强度特性	32
2. 泡沫塑料的耐热性	47
3. 泡沫塑料的热物理性能	49
4. 泡沫塑料在液体和溶剂中的性状	53
5. 腐蚀性	56
6. 泡沫塑料的吸声特性	57
7. 泡沫塑料的介电性质	59

第二章 泡沫塑料制品的构造和制造方法

第一节 热塑性泡沫塑料制品	64
1. 按比例模压法	64
2. 自动成型法	65
3. 泡沫塑料板的成型	73
第二节 在结构中发泡的泡沫塑料制品	76
1. 泡沫塑料充填结构的某些特点	77
2. IIY-101 型聚氨基甲酸酯泡沫塑料制品	78
3. $\Phi\Phi$ 和 ΦK 型泡沫塑料制品	81
4. 充填 ΦK 型泡沫塑料的制品示例	83

第三节 泡沫塑料的机械加工与胶接	97
1. 泡沫塑料的机械加工	97
2. 泡沫塑料的胶接	100
第四节 加强泡沫塑料制品	102

第三章 夹层结构的工作特点及其计算

第一节 层状结构的工作特点及其计算任务	105
第二节 夹层结构的计算	112
1. 夹层板的总稳定性	113
2. 轻质夹芯的圆柱形壁板的总稳定性	125
3. 夹层板的横向弯曲	128
4. 夹层板的纵-横向弯曲	140
5. 带夹芯的圆筒和三层夹层板压缩层的局部稳定性和带加强 层的夹层板之稳定性	141
6. 三层夹层板夹芯强度的验算	143
7. 最佳参数	148
8. 加强夹芯的弹性参数	154
9. 计算示例	157

第四章 泡沫塑料夹层结构元件的试验

第一节 泡沫塑料的试验	167
1. 压缩强度极限的测定	167
2. 压缩弹性模数和压缩比例极限的测定	168
3. 拉伸强度极限的测定	168
4. 拉伸弹性模数和拉伸比例极限的测定	169
5. 剪切模数和剪切比例极限的测定	170
6. 单位冲击韧性的测定	171
7. 泡沫塑料耐热性的测定	171
8. 泡沫塑料与结构面板胶接强度的试验	171
第二节 夹层壁板的试验	172
1. 夹芯剪切模数的测定	172
2. 壁板的试验	173
第三节 夹层结构的试验	181
参考文献	183

引 言

近几年来，在飞机制造及某些其他技术领域内出现了一种新型的結構，即所謂层状結構，或夹层結構。这种結構系由高强度材料制成的薄板承力件和强度較低但却很輕的夹芯相結合而构成的。夹芯則可以由用板片或絲材加强的和不加强的泡沫塑料、輕质木料（巴尔薩木），以及各种有加强肋的結構（如蜂巢結構、褶壁結構、波紋結構等）制成。

本书仅对泡沫塑料及其他同类輕质材料夹层結構进行分析研究。

用做外层和其他承力件的有金屬（鋼、硬鋁）、夹玻璃布胶木、木材、层板，以及織物（如玻璃布），而且其中用織物制成的夹层結構外层不仅能承受拉伸載荷，也能承受压縮載荷。不同的材料相配合也是可以的：一个承力件可用金屬制造，另一个則用木材、夹玻璃布胶木等制造。

目前經研究成功并进行大批生产的泡沫塑料有好几种，对应于体积重量不同，其强度特性和剛性亦各不相同。二十年以前，关于这种材料的报导只有在专利文献中才能見到。而到 1960 年，全世界泡沫塑料的年产量已超过了 100,000 吨，制造和加工泡沫塑料的企业有了好几百家。

如果将泡沫塑料做成加强的层状結構，即中間夹以通常是板条形式的結構材料（金屬、层板等），那末这种材料用作輕型夹芯的可能性将增大很多。此时若沿着加强材料施加载荷，則加强塑料的剛度和强度要比不加强的而体积重量相同的塑料高出很多。这种加强的泡沫塑料不以成品形式生产。夹芯系在制造結構件的过程中予以加强。

图 0.1 所示为平面的和曲面的壁板，其外承力层用金屬、夹玻璃布胶木或层板制造，夹芯（或加强层）用不加强的泡沫塑料。

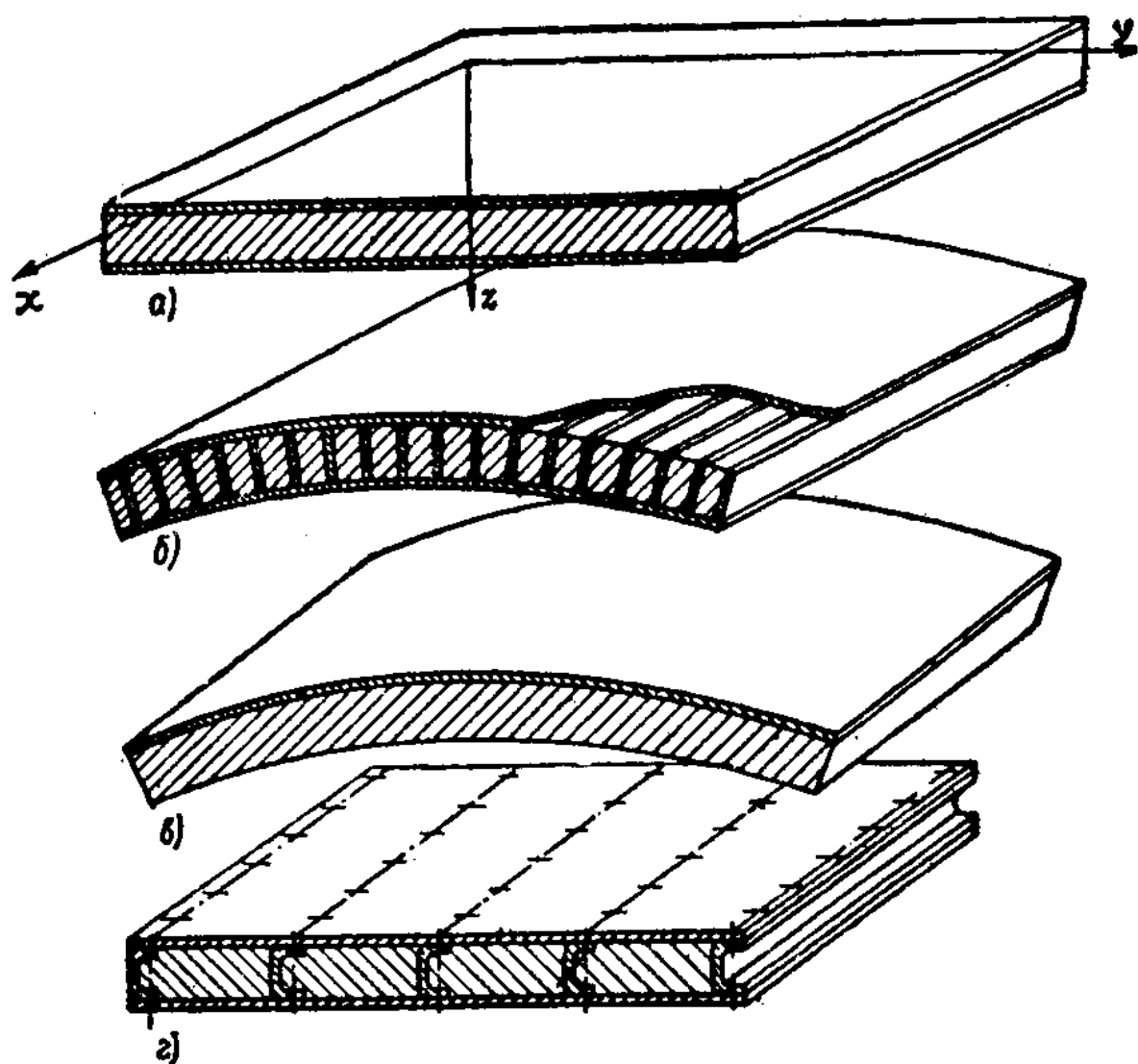


图0.1 三层壁板和加强层壁板的构造。

(图 0.1 a) 和加强的泡沫塑料(图 0.1 b) 制造。图 0.1 a, b, c 是由两个外承力层和一个中间层(即夹芯)所构成的三层壁板; 图 0.1 d 是由一个承力层和支撑层构成的壁板。图 0.1 e 这种夹层壁板的外面层与承力槽形件和轻质夹芯相连, 这种结构有时也称为组合夹层结构。

图 0.2 为带泡沫塑料夹芯的金属翼型的剖面图。这种结构已用于空气螺旋桨桨叶。作为这类夹层结构的例子还有运输机的雪橇(见图 2.30)、整流罩(见图 2.17) 等。

夹芯使外面层和其他承力构件相互连接, 从而保证其协同工作, 同时又起支承作用, 防止了结构在受压及剪切时失去稳定。

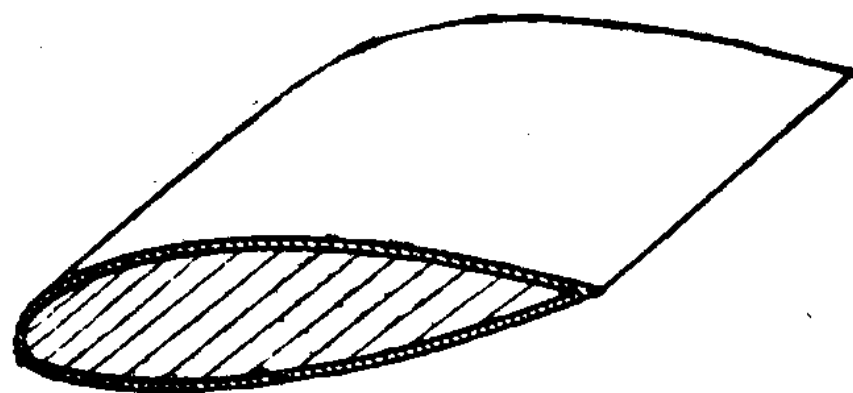


图0.2 带夹芯的翼型。

由于采用夹芯，可以用高强度材料薄板制成彼此間隔很大的結構。这种結構的重量不大，而强度和剛度却很高。若对这种承受压缩或剪切的結構和薄承力件（如三层壁板的外面层）的参数作适当的选择，就可以消除很高的应力。如沒有夹芯，这显然是不可能的。因为沒有夹芯的“支持”，薄承力件即使在很小的应力下也会失去稳定而鼓起。在許多情况下，由于使用了夹芯，就不必再采用其他加强件，从而使整个結構得到了簡化。

除上述优点外，夹层結構还有另外一些优点。特别是由于泡沫塑料的絕热、隔音性能很好，用相应方法制成的三层板結構是建造铁路車厢（尤其等溫車厢）、房屋建筑等极有前途的材料。泡沫塑料夹层結構的振动特性良好（泡沫塑料用做减震器，可保証很大的振动衰减梯度）、表面光滑，在某些情况下工艺性也很好。

这种結構的缺点是当用尖銳的东西冲击表面时往往会形成永久的压伤。

泡沫塑料按工艺原則可分为在結構中发泡的和成型的两种。

在应用結構中发泡的泡沫塑料时，充填过程是在用承力件鉚接或胶接成的結構受力骨架的蒙皮內部加入片状、顆粒状或液状的坯料，然后将結構加热。加热时由于发泡剂分解，或由于化学反应而放出气体，坯料即行发泡，体积增大若干倍。形成的泡沫塑料充滿結構內腔，同时粘接于承力件的內表面上。为避免泡沫塑料发泡时产生的余压使制品变形，結構系置于限制模內加热。經過必要的加热处理之后，結構內充滿了硬化的泡沫塑料并与承力件相粘接。

成型的泡沫塑料是用胶合并机械加工或用特制压模将其制成所需形状的块料，然后将承力件粘接到块料上。块料可用真空囊使之与外面层胶接：将結構置于囊中，抽成真空，借助外界空气的压力而将外面层压紧在块料上。

目前，泡沫塑料夹层結構已成功地应用于飞机制造工业及某些其他技术領域中。但是在研究和試驗这种結構的时候也曾多次

失敗過。個別的结构比普通结构还重,或者强度比普通结构还小。

設計者对塑料夹层结构的基本性能及制造工艺的特点并不都是知道得很清楚,就連工艺本身和质量檢驗方法,在許多情況下,也還不是很完善和研究得很够的。此外,選擇结构参数时沒有考虑到这种层状结构的工作特点及相应的計算,也往往是失敗的原因。

在每一种具体情況下,在考虑到該种夹层结构工作特点的計算基础上正确地選擇其结构参数,对解决如何恰当应用层状结构和制造合理的夹层结构这一問題具有头等重要的意义。

承力构件很厚实而用很单薄的輕质泡沫塑料来支撐,或者外层很薄而用剛度过大、体积也很大的夹芯来支撐都不可能是有效的。显然,在使用加强夹芯时,结构有效程度的大小取决于加强件的位置是否与结构的工作特性相符。

若层状结构的应用范围選擇得正确、其設計及相应的制造工艺正确,就可以极其有效地解决制造剛性和强度很好的輕型结构方面的許多問題。

不少苏联的和国外的著作都是專門論述泡沫塑料及泡沫塑料夹层结构制造工艺的。苏联这方面著作的作者有 A. A. 別尔宁、B. A. 波波夫、M. II. 薩卡雷、A. T. 图曼諾夫、A. A. 莫依謝也夫、本书作者及其他研究工作者。在苏联第一批关于夹层结构計算的苏联著作中,应当指出的是 A. Л. 拉宾諾維奇和 A. II. 伏罗諾維奇的著作。构成夹层结构計算理論的一系列著作的作者有 Э. И. 格里哥留克、Л. Э. 布留凱尔、Л. M. 庫尔申、A. П. 普魯薩柯夫及其他一些苏联作者和国外的作者。但是层状结构方面的著作的版本是各种各样的,有时很不易懂,这就难以广泛地利用这些书籍了。

本书試圖把設計泡沫塑料夹层结构及拟定其制造工艺規程所必需的材料汇集在一起,以促使夹层结构得到更广泛的应用。

书中闡述了泡沫塑料的物理机械性能,列举了实际结构的例子及其制造工艺过程,分析了輕质夹芯夹层结构的工作特点和强度計算以及结构的試驗。

主要符号

泡沫塑料的机械物理性能

- σ_b, σ_{-b} ——拉伸及压缩强度极限(公斤/厘米²);
- $\sigma_{\text{пц}}, \sigma_{-\text{пц}}$ ——拉伸及压缩比例极限(公斤/厘米²);
- δ^* ——断裂延伸率(%);
- σ_{-10} ——假定压缩强度极限(10%变形时的应力)(公斤/厘米²);
- σ_{bH} ——弯曲强度极限(公斤/厘米²);
- τ_b ——剪切强度极限(公斤/厘米²);
- $\tau_{\text{пц}}$ ——剪切比例极限(公斤/厘米²);
- E ——拉伸法向弹性模数(公斤/厘米²);
- $E_{\text{сж}}$ ——压缩法向弹性模数(公斤/厘米²);
- G ——剪切模数(公斤/厘米²);
- μ ——泊桑系数;
- σ^* ——单位冲击韧性(公斤厘米/厘米²);
- τ_{-1} ——对称循环时的剪切疲劳极限(公斤/厘米²);
- γ_0 ——泡沫塑料的体积重量(克/厘米³);
- γ_1 ——泡沫塑料用聚合物的体积重量(克/厘米³);
- α ——线膨胀系数(1/度);
- λ ——导热系数(千卡/米·小时·度);
- a_0 ——导温系数(米²/时);
- c_0 ——比热(千卡/公斤·度);
- ϵ' ——介电系数;
- $\text{tg } \delta_\epsilon$ ——介电损耗角正切;
- ρ_S ——表面电阻系数(欧);
- ρ_v ——体积电阻系数(欧·厘米);
- E^* ——绝缘强度(击穿电压)(千伏/毫米)。

夹层璧板的几何参数

- δ ——外面层厚度(外面层厚度均相同)(厘米);
- δ_1, δ_2 ——采用加强泡沫塑料夹芯时加强件及泡沫塑料层的

厚度(厘米);

$2h$ ——夹芯厚度(厘米);

a, b ——矩形夹层板的平面尺寸(厘米);

R ——三层薄壳圆筒体中间表面的半径(厘米)。

弹 性 参 数

$E_x, E_y, E_z, G_{xz}, G_{yz}, G_{xy}, \mu_{xy}, \mu_{yx}$ ——正交各向异性的加强夹芯的法向弹性模数及剪切模数(公斤/厘米²)和泊桑系数(μ_{xy} 表示 y 向变形时 x 向的变形);

$E_{np} = \frac{E}{1 - \mu^2}$ ——各向同性夹芯的折算法向弹性模数(公斤/厘米²);

$\bar{E}, \bar{G}, \bar{\mu}$ ——各向同性材料的外面层的法向弹性模数及剪切模数(公斤/厘米²)和泊桑系数;

E_1, G_1, μ_1 ——用加强泡沫塑料夹芯时加强件材料的法向弹性模数及剪切模数(公斤/厘米²)和泊桑系数;

E_2, G_2, μ_2 ——用加强泡沫塑料夹芯时泡沫塑料层的法向弹性模数及剪切模数(公斤/厘米²)和泊桑系数;

$\bar{E}_{np} = \frac{\bar{E}}{1 - \bar{\mu}^2}$ ——各向同性材料的外面层的折算弹性模数(公斤/厘米²)。

刚 性

$\bar{B} = \frac{E\delta}{1 - \mu^2}$ ——拉伸时单位宽度上各向同性外面层的刚性(公斤/厘米);

$\bar{D} = \frac{E\delta^3}{12(1 - \mu^2)}$ ——弯曲时单位宽度上各向同性外面层的刚性(公斤·厘米)。

载 荷

$2T, 2T_x, 2T_y$ ——壁板单位宽度上的纵向压缩载荷(公斤/厘米);

$2S$ ——壁板单位宽度上的剪切载荷(公斤/厘米);

$2T_K, 2T_{xK}, 2T_{yK}, 2S_K$ ——载荷临界值(公斤/厘米);

q ——均布横向载荷(公斤/厘米²)。

应力与位移

- $\bar{w}$ ——外面层在垂直于壁板方向上的挠度(厘米);
 w ——夹芯内垂直于壁板方向上的位移(厘米);
 $w_{H.K}$ ——夹层板初始反对称弯曲度(厘米);
 $w_{H.C}$ ——外面层初始对称波紋度(厘米);
 $\bar{\sigma}, \bar{\sigma}_x$ ——外面层内法向应力(公斤/厘米²);
 σ_x ——夹芯内法向应力(公斤/厘米²);
 $\sigma_x, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ——夹芯内法向应力及切向应力(公斤/厘米²);
 $\bar{\sigma}_K, \bar{\sigma}_{xK}$ —— $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\sigma}_x$ 的临界值;
 σ_{pacu} ——夹芯内的计算应力(公斤/厘米²);
 $[\sigma]$ ——夹芯的容许应力(公斤/厘米²);
 $\bar{\sigma}_{\Pi\Gamma}$ ——外面层材料的比例极限(公斤/厘米²);
 $\bar{\sigma}_T$ ——外面层材料的屈服极限(公斤/厘米²)。

第一章 泡沫塑料

第一节 概 述

1. 泡沫塑料的结构

泡沫塑料是一种轻质充气的聚合物材料，它是由固相或弹性体相（聚合物，有时是几种聚合物的混合物或者是聚合物和填料的混合物）和气相组成的两相系统。泡沫塑料一般分为闭孔泡沫塑料和连孔泡沫塑料^①。

在闭孔泡沫塑料中，气体充填在由基体聚合物发泡形成的互不连通的格子中。这种材料的结构如同凝固的泡沫(图 1.1)。

在连孔泡沫塑料中，聚合物基体形成互相连通，并充填有气体的格子或内腔(图 1.2)。

实际材料的结构很少是单一类型的。闭孔泡沫塑料的格子在某种程度上

是互相连通的，而连孔泡沫塑料结构中却有部分封闭格子。所以，这两类塑料最好统一简称为“泡沫塑料”，这个术语反映了获

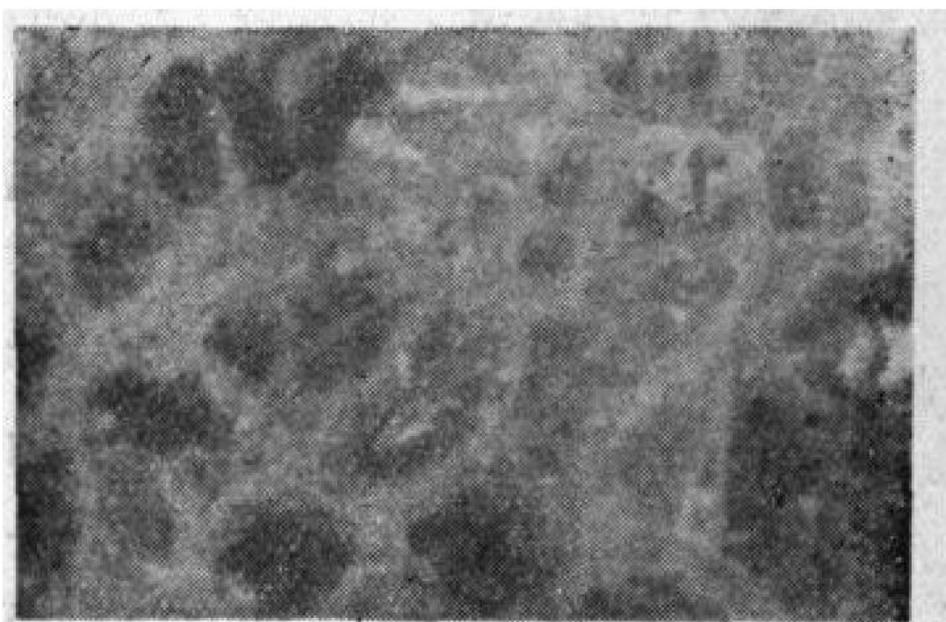


图1.1 聚苯乙烯泡沫塑料 (ПС-1) 的结构 ($\gamma_0 = 0.1$ 克/厘米³) (放大 20 倍)。

① А. А. Берлин, Основы производства газонаполненных пластмасс и эластомеров, Госхимиздат, 1954.

(苏 А. А. 别而林“气孔橡胶的生产原理” 1、4、5、6 章唐云峰等译，化学工业出版社出版1956)。

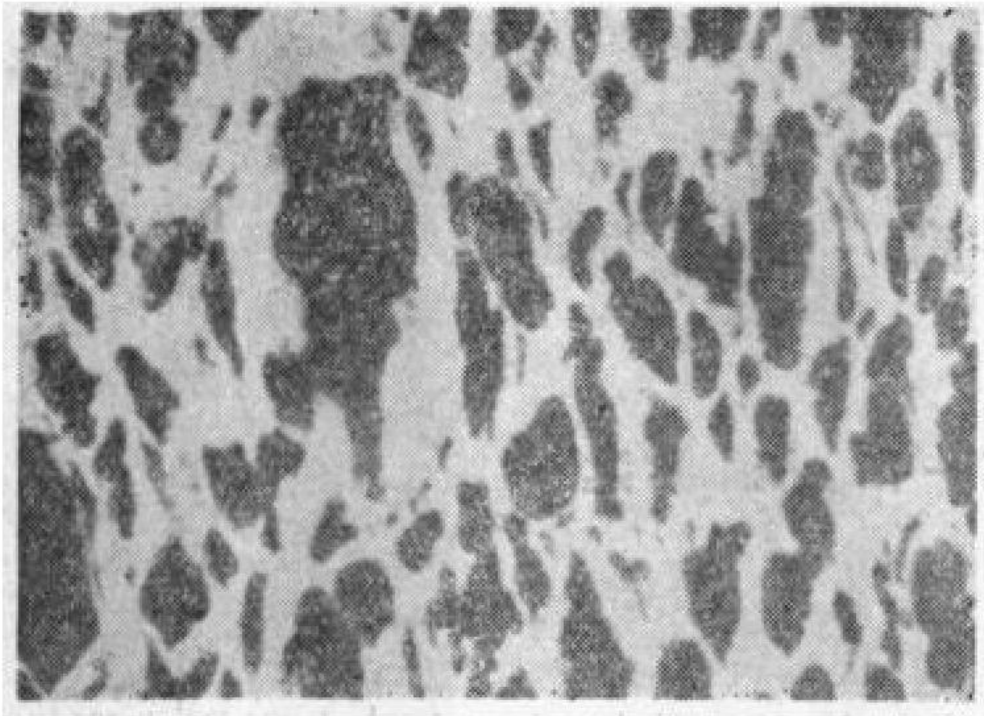


图1.2 連孔泡沫塑料（海綿橡胶）的結構（放大8倍）。

得泡沫塑料的过程（发泡过程）的实质。

2. 泡沫塑料的制造方法及工艺原理

在工业生产中，采用不同的方法制取泡沫塑料：

- 1) 由专门加在混合坯料中的发泡剂分解放出气体而发泡；
- 2) 由坯料成分之间的反应放出气体而发泡；
- 3) 由加在聚合物基本成分中的低沸点液体蒸发而发泡；
- 4) 将气体溶于聚合物中，然后除去压力而发泡；
- 5) 用机械方法搅拌发泡。

已经知道的许多种泡沫塑料，几乎都可以根据构成其基本组份的主要聚合物分为两类：

- 1) 热塑性类，即在重复加热时能变软的热可逆性材料（以聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚乙烯为基的材料）；
- 2) 热固性类，这类材料在第一次加热循环中就进行反应而硬化，在重复加热时不再软化（以聚异氰酸酯、酚-甲醛树脂、环氧树脂和有机硅树脂为基的材料）。

这两类聚合物的分子结构的特点决定了发泡过程的特点及其制成的材料的大部分性能。

热塑性聚合物的分子是由数百甚至上千个重复的链节组成的，具有线型的结构。在一般的状态下，这些分子的形式是各种各样的。当加热超过所谓玻璃化温度 T_g 时，它们具有类橡胶的性质和可逆的弹性-高弹性变形的能力。在这种状态下，分子链可以“拉长”。

图 1.3 为綫型聚合物的热机械曲线，说明材料在不同温度下受载时的状况●。

曲线分为三个基本区域：

1) 在温度 T_g 以下是可逆弹性变形区，聚合物呈玻璃态；

2) 在温度 $T_g \sim T_f$ 间是可逆高弹性变形区，聚合物呈高弹态；

3) 在温度 T_f 以上是粘性流动区。

热塑性聚合物在高弹性状态（温度超过 $T_g 10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时）发泡。这时，大分子会出

现某种取向并可获得强度最好的泡沫塑料。但是，它们的耐热性是不高的，因为在温度 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 时，随着气体从泡沫塑料格子向外扩散，加剧了松弛过程，致使泡沫塑料收缩。

与上述綫型聚合物不同，热固性聚合物的大分子具有三维的结构。分子链和链节之间在空间彼此连结起来（“缝合”）。这种三维聚合物分子在加热时不具有类橡胶的性质，不能产生高弹性变形。

所以，所有由这类聚合物做成制品的成型过程，其中包括发

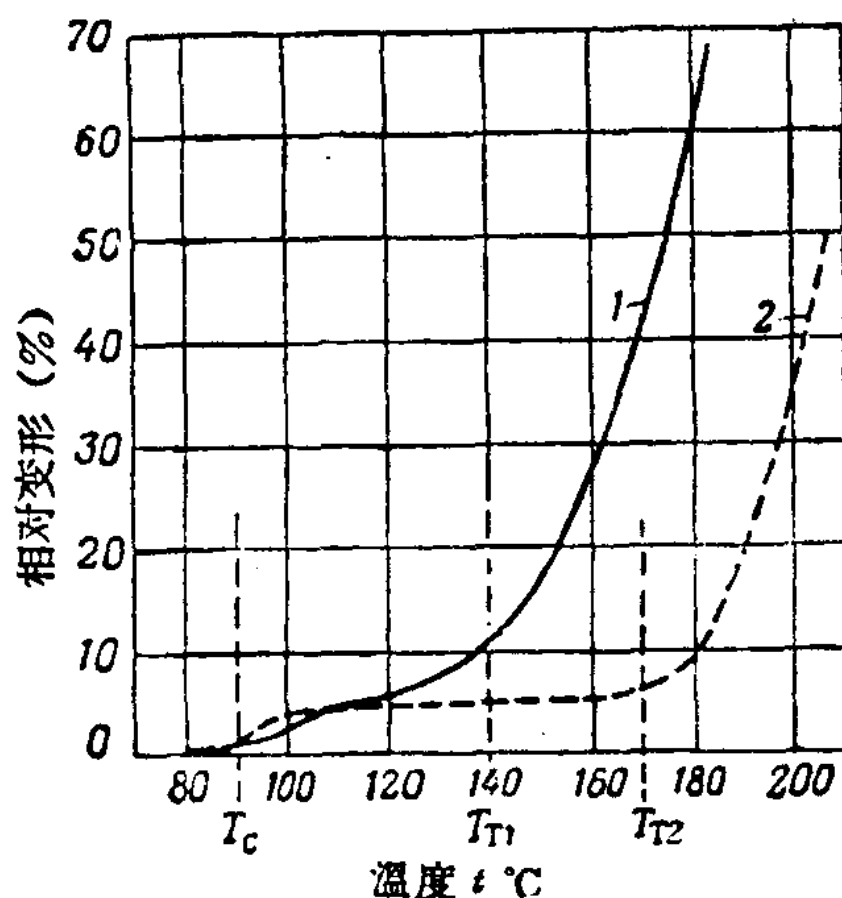


图1.3 聚苯乙烯 (1) 和聚甲基丙烯酸甲酯 (2) 受压缩时，相对变形与温度的关系。

● Я. Г. Муравин, Б. Н. Рutowский, Текучесть полимеров и ее измерение, Сб. «Высокомолекулярные соединения», вып. 9 Госхимиздат, 1949.

В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский, Краткие очерки по физико-химии полимеров, изд. МГУ, 1960. (苏 В. А. 卡尔金, Г. Л. 斯洛尼姆斯基“聚合物”等译, 科学出版社出版 1962)。

泡过程，都是在原料树脂分子或各組份尚具有粘性流动性能时于初始阶段的反应过程中进行的。在形成空間鍵合时，可以观察到这种結構尚有微小的高彈性，但是随后系統就变成密网络，聚合物最后硬化。

图 1.4 所示为热固性聚合物（甲阶酚醛树脂）在加热过程中瞬时彈性模数变化的典型曲线[●]。分子的三維結構不仅使这种材料具有較高的剛性和脆性，而且使它比綫型聚合物为基的材料具有較高的耐热性。

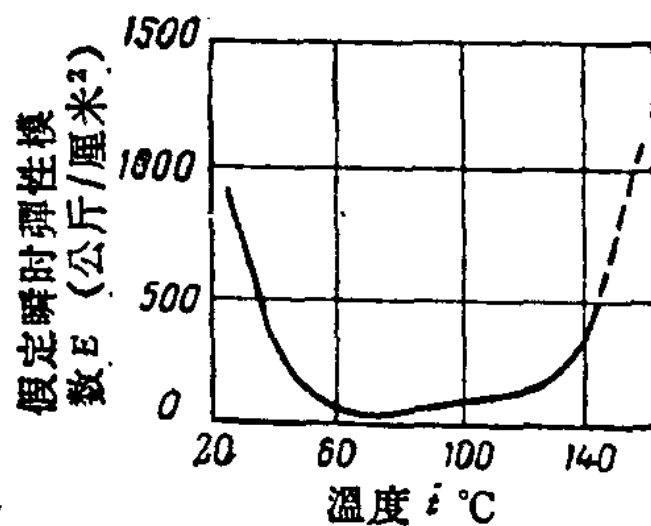


图1.4 甲阶酚醛树脂加热时瞬时压缩彈性模数的变化。

由能发泡的低分子热固性树脂組份和綫型聚合物組成的泡沫塑料配方，可以制成具有耐热性和足够的彈性-高彈性的材料。以酚-甲醛树脂与合成丁腈橡胶混合制得的 ΦK 型材料即是一例[●]。

現在，我們針對具体的聚合物和組份，来討論上述制取泡沫塑料方法的一些特点。

A. 应用固体发泡剂（生孔剂）制造泡沫塑料

在苏联的工业中，应用最广的两种用固体发泡剂制造泡沫塑料的方法是：模压法和在限制模內发泡法。

发泡剂一般是利用在可逆反应中能分解出二氧化碳气体的某些无机物质（碳酸氫鈉、碳酸銨），和在不可逆分解时能放出气体（多半是氮）的許多有机物质。表 1.1 中列出了最常用的发泡剂的数据[●]。

- Б. М. Коварская, С. И. Клаз, Об упруго-вязких свойствах фенол-формальдегидных смол, «Коллоидный журнал», 1952, т. XIV, № 6, стр. 428~433.
- Эта группа материалов разработана В. А. Поповым и др.
- R. Reed, Foaming agents, Plastics Progress, 1955.
- З. И. Казакова, М. Я. Бородин, Газообразователи для пенопластмасс Сб. «Пенопластмассы», Оборонгиз, 1960.