

Handbook of Polymer Foams

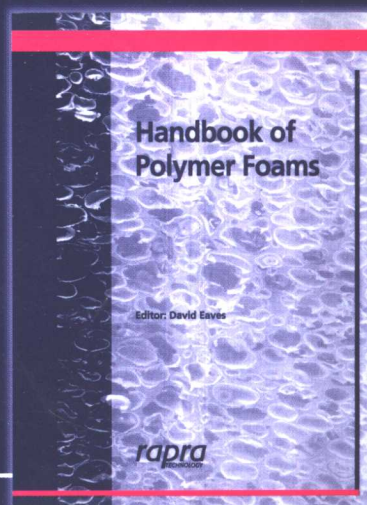
泡沫塑料

手册

[英] 大卫·伊夫斯 主编

David Eaves

周南桥 彭响方 谢小莉 等译



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

泡沫塑料手册

[英] 大卫·伊夫斯 主编
周南桥 彭响方 谢小莉 等译



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

泡沫塑料手册/[英]伊夫斯(Eaves, D.)主编;
周南桥等译. —北京:化学工业出版社, 2006. 7
书名原文: Handbook of Polymer Foams
ISBN 7-5025-8462-5

I. 泡… II. ①伊…②周… III. 泡沫塑料-技术手册
IV. TQ328-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 025635 号

Handbook of Polymer Foams/by David Eaves

ISBN 1-85957-388-6

Copyright © 2004 by Rapra Technology Limited. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Rapra Technology Limited.

本书中文简体字版由 Rapra Technology Limited 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-5844

泡沫塑料手册

[英]大卫·伊夫斯 主编

周南桥 彭响方 谢小莉 等译

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 余德华

责任校对: 于志岩

封面设计: 张 辉

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8½ 字数 216 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8462-5

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译 者 序

泡沫塑料作为一种以气体为填料的新型复合塑料，不仅质量轻，省材料，比强度高，而且具有优良的隔热、隔声、缓冲等性能。随着泡沫塑料在工业、农业、交通运输、甚至 IT 以及航天航空等高新技术领域的广泛应用，其相关科技成果引起聚合物加工领域科技人员的高度关注。时至今日，泡沫塑料及其成型技术已成为聚合物成型加工领域中的重要组成部分。

这部手册不仅全面介绍了泡沫塑料的结构与性能、发泡剂的种类和选用标准，还详细论述了聚苯乙烯、硬（软）质聚氨酯、硬（软）质聚氯乙烯、聚烯烃、海绵橡胶等聚合物的发泡成型技术和应用，同时也对聚合物发泡最新技术——“微孔泡沫塑料成型”作了介绍。该手册理论与实践相结合，内容实用，非常适合于从事泡沫塑料成型加工相关专业的高等院校师生及工程技术人员参考使用。

整部手册共分 10 章，朱文莉译前言及第 1 章，周南桥译第 2 章、第 6 章、第 7 章、第 10 章，谢小莉译第 3 章、第 9 章及文后缩略语部分，彭响方译第 4 章、第 5 章，赵艳志译第 8 章。全书由周南桥统稿，吴舜英校。研究生罗卫华、张平、湛丹、孔磊、兰庆贵、林逸全参与了初稿的部分翻译。

限于译者水平有限，译文难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

译者

2005-12-27

前 言

泡沫塑料的用途非常广泛，几乎可以应用在工业中的任何地方。例如，它可以应用在运动和娱乐产品、军事、汽车、航空和日常生活中。每天人们都有可能接触到泡沫塑料，如家具、包装、汽车、冰箱绝缘层或其他商品。

虽然人们对天然泡沫塑料（如海绵状物体、软木）的认识和应用已经有很长时间了，但人造泡沫塑料是在近 50 年才进入市场的。新的聚合物材料开发出来之后，紧接着就会出现其膨胀或发泡形式的产品，这是因为对聚合物材料发泡可以实现一些独特和有用的用途。

与不发泡的聚合物相比，泡沫塑料在可压缩性、热绝缘和密度降低（质量减轻）等方面都得到改善。这些性质可以适应特殊要求，也可以扩大聚合物的应用范围。因此，聚合物加工者们对发泡技术和发泡材料的性质都非常感兴趣。

出版这本手册的目的是为了介绍人造泡沫塑料的制造方法、性质和应用。另外，有一章内容是介绍泡沫塑料发泡基本原理的。有一章讲述泡沫塑料所使用的发泡剂，为了满足蒙特利尔协议的要求，减少和停止使用氯氟烃和其他破坏臭氧的发泡剂，最近几年人们对发泡剂进行了较大力度的改进和开发。还有一章概述了微孔泡沫塑料的新应用和新发展。每一章都附有参考文献，以便读者对该主题进行进一步的研究。

非常感谢我的合著者所作的贡献。他们都具备扎实的专业知识，并且花了大量时间来编写各自章节的内容。我也非常感

谢 RAPRA 的工作人员，尤其是 Frances Powers（责任编辑）、
Claire Griffiths（编辑助理）和 Sandra Hall（图片设计），感谢
他们处理和汇编各章稿件，使得最后的合著得以顺利完成。

David Eaves
Harbury, UK
2003 年 11 月

目 录

第 1 章 发泡基础	1
1.1 引言	1
1.2 泡沫塑料结构	1
1.3 泡沫塑料的性质	3
1.3.1 压缩性质	3
1.3.2 能量吸收性质	5
1.3.3 热性质	6
参考文献	8
第 2 章 发泡剂	9
2.1 引言	9
2.2 物理发泡剂	10
2.2.1 物理发泡剂的选择标准	11
2.2.2 卤代烃类	13
2.2.3 烃类化合物 (HC)	20
2.2.4 惰性气体	22
2.2.5 其他物理发泡剂	24
2.2.6 物理发泡剂的共混	25
2.2.7 封装物理发泡剂	25
2.2.8 根据泡沫塑料类型和用途选择物理发泡剂	25
2.3 化学发泡剂	27
2.3.1 化学发泡剂的选择标准	29
2.3.2 放热 CBA	30
2.3.3 吸热 CBA	32
2.3.4 吸热/放热化学发泡剂混合物	33

参考文献	33
第 3 章 发泡聚苯乙烯 (EPS): 发展、加工、应用及一些关键问题	36
3.1 引言	36
3.1.1 EPS 的发展	36
3.2 EPS 的模塑加工	37
3.2.1 珠粒到成品的转化	38
3.2.2 预发泡	38
3.2.3 熟化	38
3.2.4 最终模塑成型	39
3.3 EPS 的应用	39
3.3.1 包装	40
3.3.2 建筑	40
3.3.3 其他应用	42
3.3.4 新的应用	42
3.4 EPS 的性能	43
3.4.1 力学性能	43
3.4.2 绝热性能	44
3.4.3 化学性能	44
3.4.4 EPS 性能的最新研究: 对水果和蔬菜的意义	44
3.5 全球市场格局和生产商分布	45
3.5.1 欧洲	45
3.5.2 亚洲	46
3.5.3 美国	46
3.6 EPS 工业面临的关键问题	47
3.6.1 火灾	47
3.6.2 回收利用	48
3.6.3 除物理回收外的方法	50
第 4 章 硬质聚氨酯泡沫塑料	52
4.1 引言	52
4.2 材料	54

4.2.1	多元醇	54
4.2.2	异氰酸酯	57
4.2.3	发泡剂	59
4.2.4	其他添加剂	68
4.3	硬质聚氨酯泡沫塑料的制造工艺	70
4.4	硬质聚氨酯泡沫塑料的回收工艺	72
4.5	硬质聚氨酯泡沫塑料的性能	73
4.6	应用	75
4.6.1	在建筑上的应用	75
4.6.2	在设备上的应用	76
	参考文献	78
第5章	软质聚氨酯泡沫塑料	81
5.1	引言	81
5.2	化学组成	81
5.3	物料的准备	84
5.3.1	异氰酸酯	84
5.3.2	多元醇	85
5.3.3	水	86
5.3.4	表面活性剂	87
5.3.5	催化剂	87
5.3.6	颜料	89
5.3.7	抗氧化剂	89
5.3.8	光稳定剂	89
5.3.9	阻燃剂	90
5.3.10	黏结剂	90
5.3.11	其他添加剂	91
5.4	发泡工艺	91
5.4.1	原料的处理	91
5.4.2	混合	92
5.4.3	气泡生长	93

5.4.4	开孔	94
5.4.5	固化	95
5.5	设备	96
5.5.1	储存与输送	97
5.5.2	原料的混合	97
5.5.3	发泡与固化	98
5.5.4	新技术	100
5.6	软质聚氨酯泡沫塑料的性能	101
5.6.1	密度	102
5.6.2	硬度	102
5.6.3	回弹性能	103
5.6.4	孔隙率	104
5.6.5	强度	104
5.6.6	泡孔结构	105
5.6.7	耐环境性	106
5.6.8	耐疲劳性	106
5.6.9	压缩形变	106
5.6.10	可燃性	107
5.7	FPF 材料的应用	108
5.7.1	运输	108
5.7.2	家具	109
5.7.3	地毯衬垫	109
5.7.4	包装材料	109
5.7.5	特殊应用	109
5.8	环境问题	110
5.9	相关组织	112
	参考文献	113
第 6 章	硬质 PVC 泡沫塑料	121
6.1	引言	121
6.2	泡沫塑料的挤出成型	123

6.2.1	基本原理	123
6.2.2	挤出成型	124
6.2.3	加工条件的影响	129
6.3	泡沫塑料的配方技术	130
6.3.1	发泡剂	130
6.3.2	加工助剂	135
6.3.3	PVC 的类型	137
6.3.4	稳定剂	138
6.3.5	润滑剂	138
6.3.6	典型配方	138
6.4	性能	140
6.5	新的加工方法和应用	142
6.5.1	回收利用	142
6.5.2	微孔发泡	143
6.5.3	复合发泡材料	144
6.6	总结	144
	参考文献	145
第 7 章	软质 PVC 泡沫塑料	150
7.1	引言	150
7.2	软质泡沫塑料和 PVC 的类型	150
7.2.1	基于悬浮法 PVC 的软质泡沫塑料	150
7.2.2	基于分散型或者糊用 PVC 树脂的软质泡沫塑料	151
7.2.3	PVC 增塑糊吹塑泡沫塑料的基本原理	151
7.2.4	增塑糊泡沫塑料配方中使用的 PVC 树脂	156
7.2.5	矿物填料	158
7.2.6	颜料	158
7.2.7	液体增塑剂	158
7.2.8	发泡剂的类型和含量	160
7.3	利用发泡的增塑糊制成的产品	161
7.3.1	地面材料和地毯覆盖材料	161

7.3.2 覆墙材料	164
7.3.3 合成革	165
7.3.4 通用泡沫塑料	166
参考文献	166
第8章 聚烯烃泡沫塑料	168
8.1 引言	168
8.2 制备工艺和原料	169
8.2.1 挤出非交联泡沫塑料	169
8.2.2 发泡(非交联)聚烯烃珠粒	172
8.2.3 挤出交联泡沫塑料的工艺过程	174
8.2.4 模压的交联发泡工艺	181
8.2.5 注射模塑泡沫塑料工艺	183
8.2.6 氮气高压釜工艺	183
8.2.7 重复利用工艺	186
8.2.8 后制造过程	187
8.3 聚烯烃泡沫塑料的性能	189
8.4 应用	191
8.5 泡沫塑料的规格	194
8.5.1 包装	194
8.5.2 汽车	194
8.5.3 家具	195
8.5.4 浮力	195
8.5.5 航空和航天	195
8.5.6 建筑	195
8.5.7 玩具	195
8.5.8 食物接触	195
8.6 市场	196
参考文献	196
第9章 海绵橡胶	199
9.1 引言	199
9.2 Dunlop 法	200

9.2.1	间歇加工	201
9.2.2	胶乳混合物配方选择	206
9.2.3	其他组分的选择	209
9.2.4	海绵橡胶的连续加工	217
9.3	Talalay 法	219
9.4	海绵橡胶生产中的故障排除	223
9.5	性能测试	224
9.5.1	压缩永久变形	224
9.5.2	压陷硬度	224
9.5.3	抗挠性	225
9.5.4	密度	225
9.5.5	金属杂质含量	225
9.6	海绵橡胶的重要应用	226
9.6.1	交通运输	226
9.6.2	家具	226
9.6.3	特殊用途	226
	参考文献	227
第 10 章	微孔泡沫塑料	229
10.1	引言	229
10.2	微孔泡沫塑料的成型工艺	230
10.2.1	固态间歇成型	230
10.2.2	半连续加工成型	233
10.2.3	挤出和其他加工成型	234
10.3	微孔泡沫塑料的特性	234
10.4	目前研究方向	239
10.4.1	结构用微孔材料	239
10.4.2	开孔（或可渗透的）微孔泡沫塑料	240
10.4.3	亚微孔泡沫塑料和毫微孔泡沫塑料	241
10.5	商业机遇	246
	参考文献	247
	缩略语表	252

第 1 章 发泡基础

David Eaves

1.1 引言

尽管泡沫塑料的基体材料非常多并且可以被制造成多种形式，但有些原理和概念对所有的泡沫塑料是通用的。这些原理在其他地方已经有了非常详细的叙述^[1,2]。由于这些概念对于理解聚合物的性质与泡沫结构之间的关系非常有用，并且可以帮助人们预测常用泡沫塑料的物理性质，因此这一章讲述了一些基本结论。

1.2 泡沫塑料结构

大多数泡沫塑料是通过在聚合物基体中形成气泡核并使气泡长大而形成的（除了组合泡沫塑料和乳胶泡沫塑料，组合泡沫塑料是将微珠状的压缩气体混入聚合物体系中）。当气泡长大时，泡沫结构变化的整个阶段可描述如下。

- 最初，在液态基体中产生小的分散的球形气泡，同时密度稍稍减小。
- 气泡长大，但仍然保持球形，当气泡长大并形成封闭（闭孔）的压紧结构时得到最低的泡沫密度。
- 气泡进一步长大，泡沫密度进一步降低，然后气泡变形形成多面体结构，有时成为理想的五角十二面体。
- 随后，黏度和表面张力效应促使材料向交叉的气泡壁流动，相互连接形成三尖头瓣状的截面。

- 最后阶段是泡孔壁破裂，结果产生开孔泡沫塑料。

根据膨胀的程度和特殊的配方，泡沫塑料可能有以上任一种或几种结构的联合效应。因此，泡沫塑料综合性质的表征包括以下内容。

a) 泡沫塑料密度——通常用 kg/m^3 表示。更常见的是测量相对密度 (ϕ)，即泡沫塑料的密度 (ρ_f) 与纯聚合物的密度 (ρ_s) 之比，或

$$\phi = \frac{\rho_f}{\rho_s}$$

相对密度也就是泡沫材料中聚合物的体积分数。低密度泡沫塑料通常是指体积分数小于 0.1 的聚合物。

b) 泡孔大小——其测量可以通过直接观察泡沫塑料横截面来进行。常规方法是美国标准 ASTM D3576^[3] 中所描述的，计算在一定长度上横切的泡孔数量。平均弦长 t 已知，平均泡孔直径 d 通过 $d = t/0.616$ 计算。

实际上，泡孔大小通常存在一个分布范围，有时泡孔分布很广。大多数泡沫塑料制造商都提供他们所生产的泡沫塑料的平均泡孔大小或者提供泡孔大小范围的数据。泡孔的尺寸不同是由于气泡在时间和空间上的成核是随机的，是由于从小气泡中扩散的气体使大气泡长大而引起的。均匀的泡孔尺寸结构是不稳定的。从小气泡向大气泡的气体扩散可以通过经典方程来解释，该方程给出液体中包含的气泡内的压力 P 为：

$$P = \frac{2\gamma}{r}$$

这里 P 为气体和周围液体之间的压力差， γ 为界面表面张力， r 为气泡半径。小气泡包含的气体压力高于大气泡，因而扩散总是从小气泡向大气泡进行。

c) 开孔/闭孔比——通过水吸收或渗透测定。这个比值对于确定性质很重要，尤其在低密度泡沫塑料中，在软聚氨酯 (PU) 的

制造过程中也很重要。如果泡孔在膨胀阶段的末期裂开，二氧化碳从气泡内向外扩散的速度比空气扩散进入气泡内的速度快，就会使得气泡塌陷。

d) 各向异性——如果泡沫不是通过在三维方向上自由膨胀制得的，它们会显示出各向异性结构（和性质）。

这是在泡沫塑料挤出过程中经常遇到的情况。有些泡孔发生横向变形。人们在制品长度和宽度方向上测量得到的物理性质不同。制造者有时标出在这两个方向上测得的性质。

e) 泡孔形状——人们对泡沫塑料中泡孔的拓扑学已经进行了广泛的研究，大概最早的是在1664年，Robert Hooke用他新发明的显微镜观察和描述了软木中的泡孔结构。低密度泡沫塑料的泡孔通过成核气泡的膨胀和长大形成，通常被认为是五角十二面体的。在显微镜下观察通常可以发现五条边的面，面与面呈四面体连接，近似保持稳定结构所必须的角度。但是，这种几何形状并没有填满空间，更加接近观察结果的形式应是 β -十四面体，包括一些四个边的面。然而泡孔的支撑筋通常是弯曲的，所以使得泡沫塑料的密度有所增加。

1.3 泡沫塑料的性质

1.3.1 压缩性质

所有的泡沫塑料都有一个压缩应力-应变曲线（图1.1），可以划分为三个区域：

- 区域1——线性“虎克”行为区；
- 区域2——塌陷平稳区；
- 区域3——压实区。

在区域1内，闭孔泡沫塑料的线弹性行为由泡孔壁的弯曲和因内部气体压力而产生的泡孔壁拉伸引起。在区域2内，泡孔通过泡孔壁的弯曲而塌陷，或者在脆性泡沫塑料中，通过泡孔的粉碎和泡

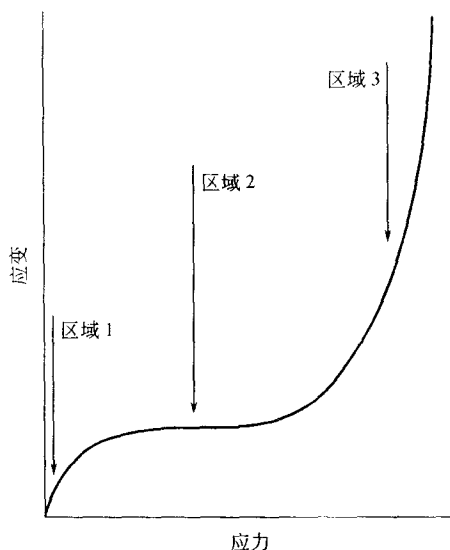


图 1.1 泡沫压缩应力-应变曲线

孔壁的破裂而塌陷。在区域 3 内，发生压实。随着泡沫塑料密度的增加，在区域 1 内杨氏模量^①增加，应力值稳定增加，压实开始时应变减少。在闭孔泡沫塑料中，泡孔中气体的压缩也是促进压实的因素。在区域 2 和区域 3 中比区域 1 压缩得更多。

在大的压缩应变下，应力-应变曲线因压实而迅速上升，并且在极限应力下趋于一个极限斜率（比原始模量高很多）。因为泡孔壁在略低的应变下连接在一起，这个应变比通过假设它在所有孔隙被消除的点可以计算的还要低。

通过理想化泡孔结构，可以将泡沫塑料性质、聚合物基体性质、泡沫塑料相对密度和泡孔结构联系起来推导公式。原始（杨氏）压缩模量、剪切模量、弹性塌陷（稳定）应力和泊松比（横向

① 即弹性模量。——译者注