

泡沫塑料

钱志屏 主编

 中国石化出版社

泡沫塑料

钱志屏 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书包括聚苯乙烯泡沫塑料、聚乙烯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料、热固性泡沫塑料、耐高温泡沫塑料、热塑性塑料结构泡沫制品、泡沫塑料标准试验方法等内容。本书较详细地介绍了各种泡沫塑料的发展概况、制造用原料的品种及性能、发泡机理、工艺及设备、泡沫塑料的性能和有关数据。

本书可供从事泡沫塑料的研究、制造及应用等部门的工程技术人员参考,也可作为大专院校高分子材料专业人员的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫塑料/钱志屏主编. - 北京:中国石化出版社,
1998

ISBN 7-80043-735-3

I. 泡… II. 钱… III. 泡沫塑料 IV. TQ328

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 14135 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010) 64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 12.25 印张 275 千字 印 1—3000

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

泡沫塑料是泡沫材料中的一个大类，也是现代塑料工业的重要组成部分。随着塑料原料工业的迅速发展及泡沫塑料制造工艺和设备的改进，泡沫塑料的品种和数量正在大幅度地增加。

泡沫塑料具有密度小、热导率低、隔热、吸音及缓冲等优良性能，价格较廉，制造工艺简单。泡沫塑料材料和制品广泛用于各个部门。

泡沫塑料系由聚合物基材和发泡气体制成的复合材料。泡沫塑料的分类方法很多，本书按聚合物品种对泡沫塑料进行分类，较详细地介绍了各种泡沫塑料的发展概况、制造用原料的品种及性能、发泡机理、制造方法、制造工艺及设备、泡沫塑料的性能及数据等，并对国际和国内泡沫塑料性能标准试验方法作简要介绍。本书编写力求理论联系实际，突出泡沫塑料的制造。

本书可供从事泡沫塑料的研究、制造及应用等部门的工程技术人员参考，也可供大专院校高分子材料专业人员参考。

本书共分十章，其中第二章由钱志屏、高克铭编写，第四章由钱志屏、季宝山编写，第十章由冯伟编写，第一、三、五、六、七、八、九章由钱志屏编写。全书由钱志屏主编。本书编写过程中曾得到上海塑料制品公司总工程师、上海塑料工程学会理事长陈由群教授的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1996年11月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 聚苯乙烯泡沫塑料	12
第一节 概述	12
第二节 乳液聚合聚苯乙烯泡沫塑料	13
一、模压发泡法	13
二、挤出发泡法	17
第三节 可发性聚苯乙烯泡沫塑料	19
一、可发性聚苯乙烯珠粒的制造	19
二、可发性聚苯乙烯泡沫塑料模压发泡	26
三、可发性聚苯乙烯珠粒挤出发泡	45
四、可发性聚苯乙烯珠粒挤出发泡吹塑	54
第四节 聚苯乙烯泡沫塑料的性能	56
一、力学性能	56
二、热性能	59
三、吸水性	62
四、水蒸气渗透性	63
五、吸声性	63
六、能量吸收性	63
七、电性能	64
八、抗蚀性	65
九、可燃性	65
十、光稳定性	66
十一、毒性	66
第五节 发泡聚苯乙烯颗粒用作功能组分	67
第三章 聚乙烯泡沫塑料	69

第一节 概述	69
第二节 聚乙烯泡沫塑料制造用原料	70
第三节 聚乙烯泡沫塑料的制造	75
一、挤出发泡法	75
二、模压发泡法	88
三、可发性聚乙烯粒料模压成型法	95
四、旋转发泡成型法	97
五、聚乙烯溶液涂覆发泡法	99
第四节 聚乙烯泡沫塑料的性能	102
一、泡沫塑料结构变量与物理性能的关系	102
二、聚乙烯泡沫塑料性能综述	107
第五节 聚乙烯泡沫塑料的应用	114
第六节 聚丙烯泡沫塑料	115
一、概述	115
二、聚丙烯泡沫塑料制造用原料	116
三、聚丙烯泡沫塑料的制造	117
四、聚丙烯泡沫塑料的性能	120
第四章 聚氯乙烯泡沫塑料	122
第一节 概述	122
第二节 聚氯乙烯泡沫塑料制造用原料	123
第三节 聚氯乙烯泡沫塑料的制造	132
一、软质聚氯乙烯泡沫塑料模压发泡成型	132
二、硬质聚氯乙烯泡沫塑料的制造	137
第四节 增塑糊泡沫塑料	155
一、概述	155
二、增塑糊	155
三、发泡增塑糊的配制	156
四、增塑糊泡沫塑料制造用原料	158
五、增塑糊泡沫塑料的制造	162
六、增塑糊泡沫塑料的力学性能	173

第五章 聚氨酯泡沫塑料	176
第一节 概述	176
第二节 聚氨酯泡沫塑料的制造原理	178
一、发泡过程中的化学反应	178
二、催化剂在发泡过程中的作用	182
第三节 聚氨酯泡沫塑料制造用原料	188
第四节 聚氨酯泡沫塑料的制造	196
一、异氰酸酯与多元醇的化学用量计算	196
二、软质聚氨酯泡沫塑料的制造	198
三、半硬质聚氨酯泡沫塑料的制造	208
四、硬质聚氨酯泡沫塑料的制造	211
第五节 发泡成型工艺	223
第六节 氟氟烃发泡剂的替代	228
第六章 热固性泡沫塑料	232
第一节 酚醛泡沫塑料	232
一、概述	232
二、酚醛泡沫塑料制造用原料	233
三、酚醛泡沫塑料的制造	241
四、酚醛泡沫塑料的性能	246
五、酚醛泡沫塑料的应用	253
第二节 脲甲醛泡沫塑料	255
一、概述	255
二、脲甲醛泡沫塑料制造用原料	255
三、脲甲醛泡沫塑料的制造	259
四、脲甲醛泡沫塑料的性能	267
五、脲甲醛泡沫塑料的应用	272
第三节 环氧泡沫塑料	273
一、概述	273
二、环氧泡沫塑料制造用原料	274
三、环氧泡沫塑料的制造	280

四、环氧泡沫塑料的性能	283
五、环氧泡沫塑料的应用	288
第七章 其他品种泡沫塑料	289
第一节 聚乙烯吡唑泡沫塑料	289
一、概述	289
二、聚乙烯吡唑泡沫塑料的制造	289
三、聚乙烯吡唑泡沫塑料的性能	294
第二节 聚酯泡沫塑料	298
一、概述	298
二、聚酯树脂制造用原料	299
三、聚酯泡沫塑料的制造	300
四、聚酯泡沫塑料的应用	302
第三节 醋酸纤维素泡沫塑料	303
一、概述	303
二、醋酸纤维素泡沫塑料的制造	303
三、醋酸纤维素泡沫塑料的性能	304
四、醋酸纤维素泡沫塑料的应用	304
第四节 聚乙烯醇缩甲醛泡沫塑料	305
一、概述	305
二、聚乙烯醇缩醛化的反应机理	305
三、聚乙烯醇缩甲醛泡沫塑料制造用原料	307
四、聚乙烯醇缩甲醛泡沫塑料的制造	310
五、发泡机理	313
六、聚乙烯醇缩甲醛泡沫塑料的性能	314
七、聚乙烯醇缩甲醛泡沫塑料的应用	315
第五节 聚四氟乙烯泡沫塑料	315
一、概述	315
二、聚四氟乙烯泡沫塑料的制造	316
第八章 耐高温泡沫塑料	318
第一节 概述	318

第二节 聚苯并咪唑泡沫塑料	318
一、概述	318
二、聚苯并咪唑的合成及泡沫塑料的制造	319
三、聚苯并咪唑泡沫塑料的性能	321
第三节 聚酰亚胺泡沫塑料	322
一、概述	322
二、聚酰亚胺的合成及泡沫塑料的制造	323
三、聚酰亚胺泡沫塑料的性能	324
第九章 热塑性塑料结构泡沫制品	327
第一节 概述	327
第二节 结构泡沫塑料制品制造用原料	328
第三节 结构泡沫塑料制品的制造	335
第四节 结构泡沫塑料制品的性能	345
第十章 泡沫塑料性能及测试方法	349
第一节 线性尺寸和表观密度	349
第二节 泡沫结构	351
第三节 力学性能	358
第四节 气体渗透性能	370
第五节 吸水性	376
第六节 尺寸稳定性	377
第七节 热性能	378
第八节 老化性能	381
第九节 燃烧性能	381
第十节 其他性能	384

第一章 绪 论

泡沫塑料可定义为气体分散于固体聚合物中所形成的聚集体。泡沫塑料的密度取决于气体与固体聚合物的体积之比。对于低密度泡沫塑料来说，气体与固体聚合物的体积比为 9:1；对于高密度泡沫塑料来说，气体与固体聚合物的体积比为 1.5:1。所以泡沫塑料是指气体与塑料的体积之比在 9:1~1.5:1 范围内的材料。

一、泡沫结构

液状泡沫中可能存在的三种泡孔构型如图 1-1 所示，a 为球体泡孔，球体泡孔具有最小界面和毛细管压力，它是一种最稳定的泡孔构型，但是密堆排列的球体泡孔的体积不超

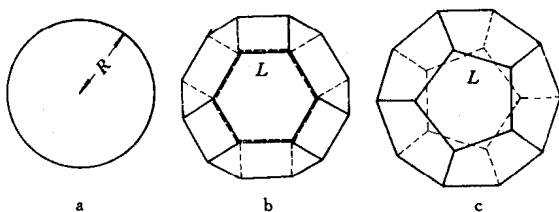


图 1-1 泡沫塑料中可能存在的三种泡孔构型

a—球体泡孔；b—十四面体泡孔；c—五边形十二面体泡孔

过有效空间的 74%。密堆排列球体泡孔进一步膨胀，其体积超过系统总体积的 3/4 时，泡孔构型由球体变成规则的多

面体构型，b 和 c 分别为 Kelvin's 十四面体和五边形十二面体。Kelvin's 十四面体是由 6 个正方形和 8 个六边形组成。两种多面体泡孔构型中，五边形十二面体泡孔构型的存在可能性更大，因为五边形十二面体是一种等角几何形状，泡孔壁面成 120° 角相交形成泡孔棱，泡孔棱以 109.5° 夹角交会，这种泡孔构型最适宜存在于液态泡沫中。

图 1-2 显示了相邻泡孔之间形成的泡孔棱的几何形状。a 为密堆排列球体泡孔所形成的泡孔棱。b 为规整的五边形十二面体泡孔密堆排列所形成的泡孔棱，这种形式实际上在液体泡沫中是不存在的，因为液相中毛细管压力无限大。c 为排泄型十二面体泡孔排列所形成的泡孔棱，这是一种理想的闭孔结构泡孔构型，固体与气体的相对量即可表征为泡沫塑料的表观相对密度，泡孔壁面和泡孔棱之间固体的分布取决于发泡过程液体的粘度、毛细管压力和表面张力三者之间力的平衡，这种力的平衡在发泡过程中随时间缓慢变化。

泡孔连续膨胀和毛细管压力推动液体向泡孔棱聚集，泡孔壁面变薄，这个过程发展到极限时，泡孔壁面开始穿孔、泡沫塌瘪、相邻泡孔并泡，或泡孔壁面收缩，或泡孔破裂。若要获得此结果，只要增大液体的粘弹性，当泡沫中泡孔壁面的 $1/6$ 或更多的部分破裂，即获得完全开孔的泡孔结构，如图 d 所示的开孔结构十二面体泡孔排列所形成的泡孔棱。图 e 为泡孔壁面液体全部被引入泡孔棱，形成框架型泡孔结构，这种结构具有最小的表面积，实际上是一种不太可能发生的极限情况。

图 1-3 显示了液体泡沫中可能存在的几种泡孔构型的平面排列形式。图 a 为闭孔结构球体泡孔密堆排列形式，该形式泡沫体的堆积（或松散）密度为密实体密度的 $1/4$ ，并

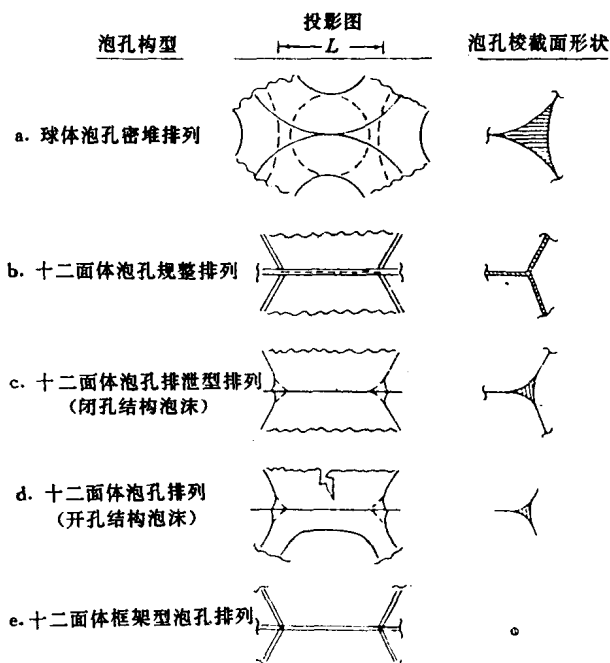


图 1-2 相邻泡孔之间形成的泡孔棱的几何形状

与球体直径无关。该形式泡沫体的堆积密度可通过小的球体泡孔填充大泡孔之间的空隙来降低，如图 b 所示。但是这样的泡沫结构在发泡过程中是极不稳定的，因为小泡孔产生较高的毛细管压力，引起小泡孔并入邻近的大泡孔。图 c 显示，规整的十二面体泡孔构型（闭孔结构）的几何排列形式，实际上这种构型的泡孔密堆排列填满全部空间必须稍微变形才可，如图 d 所示。

Kelvin's 十四面体泡孔构型密堆排列填满全部空间不需变形即可，但是这种十四面体泡孔构型在液体泡沫中的泡孔

的毛细管压力是不平衡的。另一种 Williams 十四面体是由 2 个四边形、8 个五边形和 4 个六边形组成的，这种十四面体泡孔构型密堆排列填满全部空间也不需变形。

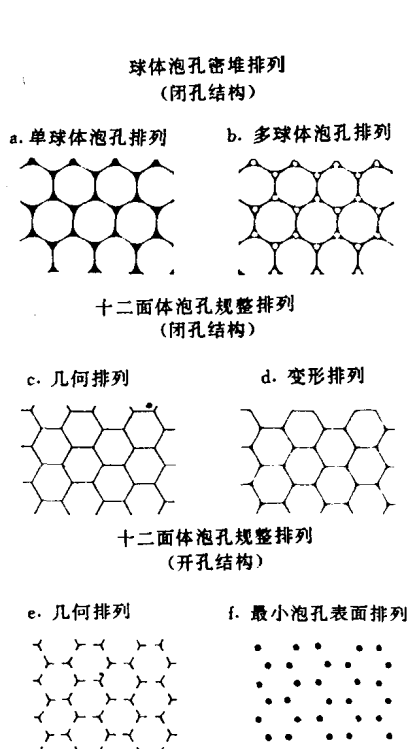


图 1-3 液体泡沫中几种泡孔构型的平面排列形式

图 e 所示为开孔结构十二面体泡孔构形平面排列形式。图 f 所示为开孔结构十二面体泡孔构形，它具有最小的泡孔壁面，形成框架型开孔结构。

泡沫塑料的制造是通过化学反应产生的气体，或机械搅拌引入的空气，或蒸发的气体均匀分布在液体中而完成发泡，然后通过冷却或聚合反应而稳定泡沫，因此，工艺条件对泡沫的泡孔构型和尺寸影响很大，泡孔的构型和尺寸在较宽的范围内变化。

闭孔和开孔结构泡孔的构型通常近似于图 1-2 中的第三和第四种情况。

泡沫中泡孔的数目取决于泡孔核的数目和泡孔界面稳定性。一般来说，粗大泡孔的泡沫塑料，其单位体积的泡孔数约为 61 个/cm^3 ；普通泡沫塑料，其单位体积的泡孔数约为

11~23 个/cm³；微孔泡沫塑料，其单位体积的泡孔数约为 39 个/cm³。

二、力学性能

泡沫塑料也可说是一种填料填充的复合材料，然而这种复合材料中的填料是既无“质量”又无强度的气体。如果我们承认泡沫塑料是气体填充的复合材料，那末，它和固体填料填充的复合材料一样，复合材料的结构与性能之间必然存在一定的关系。固体填料填充的复合材料，其力学性能与固体填料的体积分数、颗粒大小及分散度等有着密切的关系，例如填料细小、分散的复合材料的力学性能好于填料粗大、结团的复合材料的力学性能。同理，泡沫塑料的力学性能与密度、泡孔大小及分散度有着密切关系。密度高、泡孔细小均匀的泡沫塑料的力学性能较好；反之，密度低、泡孔粗大不均匀的泡沫塑料的力学性能较差。

固体填料的几何形状也是影响复合材料强度的因素，例如纤维状填料能提高固体复合材料的拉伸强度，同理，泡沫塑料中泡孔的几何形状亦影响其力学性能。在发泡过程中，

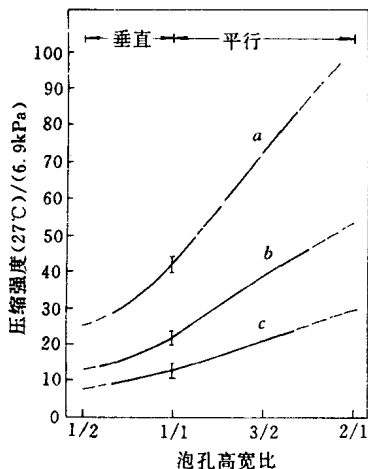


图 1-4 泡孔几何形状对硬质泡沫塑料压缩强度的影响

- a—聚氨酯，密度 48kg/m³，
聚苯乙烯，密度 32kg/m³；
- b—聚氨酯，密度 32kg/m³；
- c—聚氨酯，密度 24kg/m³，
酚醛，密度 32kg/m³

泡孔随泡沫上升而取向,球形孔变成椭球形孔,平行泡沫上升方向的压缩强度高于垂直泡沫上升方向的压缩强度,这表明了泡孔取向对泡沫塑料力学性能的影响。图1-4显示了泡孔几何形状对硬质泡沫塑料压缩强度的影响。泡孔的高宽比(高度与宽度之比) >1 ,表示作用应力的方向与泡沫上升方向(泡孔拉长方向)相平行;泡孔的高宽比 <1 ,表示作用应力的方向与泡沫上升方向相垂直。从图中可以看出高宽比 >1 ,压缩强度明显增大。

三、热膨胀性能

硬质泡沫塑料的线热膨胀系数主要决定于泡沫塑料中固体聚合物的线热膨胀系数,但是泡孔结构和泡孔形状对泡沫塑料的线热膨胀系数有影响。开孔结构对线热膨胀系数无影响。闭孔结构对线热膨胀系数有影响,截留在闭孔中的气体压力随温度而变化,气体压力变化引起泡孔棱受力而变形,这种变化影响泡沫塑料的线热膨胀系数。表1-1列出了硬质泡沫塑料的线热膨胀系数。

表1-1 硬质泡沫塑料的线热膨胀系数 ($-62\sim 60^{\circ}\text{C}$)

泡孔结构	泡孔形状	泡沫塑料密度/ (kg/m^3)	线热膨胀系数/ ($10^{-5}\text{mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$)
开孔结构	任何形状	16~112	6.3
闭孔结构	任何形状	48~112	7.2
闭孔结构	规整泡孔	16	9.0
闭孔结构	拉长泡孔	16	16.2

从表中数据可以看出闭孔结构泡沫塑料、拉长泡孔的线热膨胀系数大于规整泡孔的线热膨胀系数,这表明了泡孔形状的影响。

四、隔热性能

泡沫塑料具有的优良隔热性能与它的组分和结构有着密切的关系。尽管泡沫塑料的热传递机理非常复杂，影响的因素很多，但可以根据热的对流、传导和辐射传递的理论分析，定性地评价泡沫塑料的隔热性能。

1. 热的对流传递

低密度泡沫塑料固体聚合物的体积分数约为 4%~5%，泡沫塑料中气体占了绝大部分。泡沫的闭孔率在 90% 左右。气体被封闭在泡孔中，这是阻止泡沫中气体对流传热的最有效方法。但是泡孔尺寸是直接影响泡孔内气体能否发生对流传热的因素，而泡孔尺寸又决定了泡孔内气体对流的毛细管阻力，当泡孔尺寸小于某一值时，毛细管阻力极高，气体对流传热即停止。

泡孔内气体对流能否发生，可根据 Jeffery 判断，即从准数 L 的值的范围来确定，即

$$L = \frac{g\alpha(\theta_1 - \theta_2)d^3}{H\gamma} \quad (1-1)$$

式中 H ——气体热扩散， $H = \frac{\lambda}{\rho c}$ ；

λ ——气体热导率；

ρ ——气体密度；

c ——气体比热容；

α ——气体膨胀系数；

d ——流层厚度（即泡孔直径）；

$\theta_1 - \theta_2$ ——流层温差（即泡孔两边温差）。

准数 L 的临界值为 1709，即 $L < 1709$ ，泡孔内气体不

发生对流传热； $L \geq 1709$ ，泡孔内气体发生对流传热。

现以低密度硬质聚氨酯泡沫塑料为例，泡沫的泡孔近似看作球体，直径 0.117cm，泡孔内为 CO_2 气体，隔热层为 25mm，隔热层两边温差 10°C 。计算结果准数 $L = 58$ ，由此可知，在此种泡沫塑料中一般都不会发生对流传热。

2. 热的传导传递

泡沫塑料的热传导传递是通过聚合物基材和泡孔内的气体进行的。泡沫中气体体积占总体积的 90% 以上，因此，气体对热的传导传递起着主导作用。

根据傅里叶导热定律和泡沫导热模型推导得下式：

$$\frac{\bar{\lambda}}{\lambda_0} = \frac{(1-f) + \frac{\lambda_1}{\lambda_0} f}{(1-f-p) \frac{\lambda_0}{\lambda_1} + (f+p)} \quad (1-2)$$

式中 $\bar{\lambda}$ ——泡沫塑料热导率；

λ_0 ——泡孔中气体热导率；

λ_1 ——聚合物基材热导率；

p ——泡孔中气体的体积分率；

f ——垂直热流方向相邻泡孔间固相（聚合物）的面积分数， $f \approx 2(1-p)/3$ 。

计算结果表明：虽然聚合物基材的热导率高于泡孔中气体的热导率，然而基材对泡沫塑料的热导率的贡献却很小。由此可见，泡沫塑料的热导率主要决定于泡孔中气体的热导率。气体的热导率愈小，泡沫塑料的热导率愈低，它的隔热性能愈好。

3. 热的辐射传递

可以想象，泡沫塑料中泡孔壁是极薄的，吸收辐射热是