

王向东 王勇 郭鑫齐 李莹 编著

JISU JUBENYIXI PAOMOSULIAO

挤塑聚苯乙烯 泡沫塑料



化学工业出版社

王向东 王勇 郭鑫齐 李莹 编著

JISU JUBENYIXI PAOMOSULIAO

挤塑聚苯乙烯 泡沫塑料



化学工业出版社

·北京·

挤塑聚苯乙烯泡沫塑料

前言

挤塑聚苯乙烯泡沫塑料（XPS）问世至今已过半个多世纪，在过去的 10 多年，我国 XPS 行业走过了一条从国外引入技术到国内消化吸收提高的道路。在众多业界人士的长期努力下，XPS 泡沫塑料已经发展成为一个较大的产业，产品已经广泛应用于建筑保温、冷链物流、土木工程等众多领域，我国的 XPS 泡沫塑料产量已经居于世界前列。

在快速发展的同时，我国 XPS 泡沫塑料行业当前也面临众多问题和挑战，比较突出的问题是如何在产量急剧增加的同时兼顾产品质量的提升。近年连续发生的几场大火对 XPS 泡沫塑料行业的可持续发展产生了重大影响。值得一提的是，只有严格控制产品质量、切实执行相关标准和规范，才能确保行业在未来的健康发展。

为了兑现《蒙特利尔公约》承诺，我国环保部门自 2009 年开始进行 XPS 泡沫行业 HCFCs 发泡剂的淘汰工作，笔者因为从事相关研究有幸参与了该项工作，此时才发现一些 XPS 泡沫塑料企业多进行粗放式、经验式的生产，亟须若干理论知识以备生产所需。在此之前虽有《泡沫塑料成型》（吴舜英、徐敬一著）、《泡沫塑料成型加工》（张京珍著）等多本关于泡沫塑料的著作问世，但一直鲜见 XPS 泡沫塑料相关的理论专著问世。

因此，我们组织了相关专业人员，结合自己的研究经验，参阅了大量的文献资料编写此书。在阐述发泡基本理论的基础上，力求系统地介绍 XPS 泡沫塑料成型加工性能及应用、配方及工艺、设

备、检测方法、行业标准及发展趋势等各个方面的内容。

本书整体上可以分为6个部分。第1章主要介绍XPS泡沫塑料的发展历史、性能、应用领域及行业总体情况等；第2章主要介绍XPS泡沫塑料的成型原理、原材料及配方、成型设备及成型工艺等；第3章主要介绍HCFCs发泡剂的替代情况，包括替代原则、替代技术现状及几种较成熟的替代技术等；第4章主要介绍XPS泡沫塑料的燃烧过程、阻燃机理及阻燃性能的评估手段等；第5章主要介绍XPS泡沫塑料的检测方法，包括微观结构的表征以及物理性能、力学性能、热性能和燃烧性能的测试等；第6章主要介绍XPS泡沫塑料行业的ISO、中国、美国、德国、日本等国家的标准情况。

本书旨在为业界从业人员、研究人员、大中专院校相关专业学生提供XPS泡沫塑料的全面情况，使他们更积极地投身到这项已经发展起来的事业中，使其未来更加繁荣。

全书共6章，主要由北京工商大学轻工业塑料加工应用研究所王向东、李莹；环境保护部环境保护对外合作中心王勇、南京法宁格节能科技有限公司郭鑫齐编写，王振华也参与了部分编写工作。其中第1章由王勇编写；第2章由王向东、郭鑫齐编写；第3章由王向东、王勇编写；第4章由李莹、王振华编写；第5章、第6章由李莹、王向东编写，全书由王向东进行统稿。此外，中国塑料加工工业协会孟庆君、北京化工大学杜中杰、全国塑料制品标准化技术委员会孙辉、北京中拓机械有限责任公司唐庆华也对本书的编写提出了宝贵意见。

本书出版之际，向所有参与编著的人员、向所参阅文献的作者和整个XPS泡沫塑料行业的同仁表示衷心感谢！

由于笔者的经验和水平所限，书中难免会存在不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 聚合物发泡材料简述	1
1.1.1 聚合物发泡材料的分类方法	1
1.1.2 聚合物发泡材料的发展历程	2
1.1.3 聚合物发泡材料的应用领域	4
1.2 建筑保温材料简述	5
1.2.1 无机保温材料	6
1.2.2 有机保温材料	11
1.3 XPS 泡沫塑料的主要性能	13
1.3.1 热导率	13
1.3.2 长期热阻	14
1.3.3 压缩强度	15
1.3.4 阻燃性能	15
1.3.5 防潮及防腐蚀性能	16
1.4 XPS 泡沫塑料的应用领域	17
1.4.1 建筑保温领域	17
1.4.2 冷链物流领域	25
1.4.3 土工领域	25
1.5 XPS 泡沫行业的总体情况	27
1.5.1 行业现状	27
1.5.2 技术现状	28
1.6 XPS 行业的发展趋势	31

参考文献	33
第 2 章 XPS 泡沫塑料的成型加工	35
2.1 发泡成型原理	35
2.1.1 气泡成核	36
2.1.2 气泡增长	40
2.1.3 气泡塌陷和破裂	42
2.1.4 固化成型	43
2.2 原材料	44
2.2.1 聚苯乙烯树脂	44
2.2.2 发泡剂	47
2.2.3 成核剂	49
2.2.4 阻燃剂	50
2.2.5 其他助剂	51
2.3 成型工艺	52
2.3.1 原材料和产品配方的选择	52
2.3.2 原材料的喂料	52
2.3.3 挤出过程	53
2.3.4 发泡过程	53
2.3.5 冷却定型和牵引	54
2.3.6 定长切断	54
2.3.7 影响发泡质量的主要工艺参数	54
2.3.8 XPS 生产过程工艺控制	55
2.3.9 常见问题及解决方案	56
2.4 成型设备	60
2.4.1 挤出生产线	60
2.4.2 二次加工设备	77
2.4.3 自动化辅机系统	79
2.4.4 边角料回收装置	79
2.4.5 中央吸尘装置和边角料的回收处理装置	83
2.5 真空发泡	84

2.6	典型的 XPS 挤出发泡机组技术参数	84
2.6.1	物料及产品参数	84
2.6.2	工厂要求	85
2.6.3	工艺流程图	85
2.6.4	产品明细单	85
2.6.5	主要部件技术说明	87
2.6.6	备件单	93
	参考文献	93
第 3 章	HCFCs 发泡剂的替代	95
3.1	HCFCs 替代原则	97
3.2	HCFCs 替代品	99
3.2.1	惰性气体发泡剂	99
3.2.2	烃类发泡剂	100
3.2.3	氢氟烃类发泡剂	101
3.2.4	组合发泡剂	102
3.3	HCFCs 替代技术	103
3.3.1	欧盟地区	103
3.3.2	日本	105
3.3.3	北美地区	106
3.3.4	中国 XPS 泡沫行业 HCFCs 替代技术现状	107
3.3.5	中国 XPS 泡沫行业 HCFCs 替代的特点	112
3.3.6	中国 XPS 泡沫行业 HCFCs 替代的难点	114
3.3.7	替代产品的性能及市场	118
3.3.8	几种较成熟的替代技术	119
	参考文献	129
第 4 章	XPS 泡沫塑料的阻燃技术	132
4.1	高分子材料的燃烧特征及阻燃机理	132
4.1.1	物质的燃烧过程	132
4.1.2	高分子材料的燃烧特征	134
4.1.3	高分子材料的阻燃机理	135

4.1.4	高分子材料用阻燃剂	137
4.2	XPS 的燃烧和阻燃机理	145
4.2.1	XPS 的燃烧过程	145
4.2.2	XPS 用溴系阻燃剂的阻燃机理	146
4.2.3	溴系阻燃剂与三氧化二锑的协同阻燃机理	146
4.3	XPS 的阻燃技术	147
4.3.1	XPS 阻燃技术现状	147
4.3.2	六溴环十二烷的特性	149
4.3.3	六溴环十二烷在 XPS 中的应用	152
4.3.4	六溴环十二烷的替代技术	154
4.3.5	阻燃 XPS 泡沫塑料的成型加工	155
4.4	XPS 泡沫塑料阻燃性能的评估	159
4.4.1	泡沫塑料阻燃性能的特征	159
4.4.2	建筑材料及制品阻燃性能的特征	162
4.4.3	外墙保温材料的临时防火规定	166
	参考文献	170

第 5 章 XPS 泡沫塑料的检测方法

5.1	微观结构	173
5.1.1	开孔和闭孔结构	173
5.1.2	泡孔的微观结构	173
5.1.3	泡孔结构的表征	174
5.2	物理性能	179
5.2.1	表观密度和真密度	179
5.2.2	规格和尺寸偏差	181
5.2.3	尺寸稳定性	182
5.2.4	吸水率	185
5.2.5	水蒸气透过系数	187
5.2.6	冻融循环	192
5.3	力学性能	195
5.3.1	压缩性能	195

5.3.2	弯曲性能	199
5.3.3	剪切强度	202
5.3.4	压缩蠕变	204
5.3.5	拉伸强度	207
5.4	热性能	208
5.4.1	热导率和热阻	208
5.4.2	长期热阻	211
5.5	燃烧性能	215
5.5.1	极限氧指数	215
5.5.2	燃烧性能分级	217
5.5.3	锥形量热分析	225
5.5.4	烟密度	227
	参考文献	227
第6章	XPS 泡沫塑料国内外行业标准	230
6.1	中国 XPS 泡沫行业标准现状	230
6.1.1	中国 XPS 泡沫行业相关标准	230
6.1.2	绝热用 XPS 标准	232
6.1.3	公路工程用 XPS 标准	235
6.1.4	CRTSⅡ型板式无砟轨道高强度挤塑板暂行技术条件	239
6.1.5	企业主要关注的性能指标	243
6.1.6	企业对现行国家标准的意见	247
6.2	XPS 行业 ISO 标准	248
6.2.1	分类方法	248
6.2.2	规格尺寸和尺寸偏差	248
6.2.3	产品的性能要求	249
6.2.4	产品的试验方法	249
6.3	德国 XPS 行业标准状况	250
6.3.1	德国 XPS 泡沫行业相关标准	250
6.3.2	建筑绝热用 XPS 标准	253
6.3.3	土木工程和轻质填充物用 XPS 标准	261

6.4 美国 XPS 行业标准状况	268
6.4.1 美国 XPS 泡沫行业相关标准	268
6.4.2 绝热用 XPS 标准	269
6.4.3 土木工程用 XPS 标准	272
6.5 日本 XPS 行业标准状况	273
6.5.1 日本 XPS 泡沫行业相关标准	273
6.5.2 绝热用 XPS 标准	274
6.6 其他国家 XPS 行业标准状况分析	277
参考文献	281

第1章 绪论

1.1 聚合物发泡材料简述

发泡是一种热力学驱动的动力学现象，泡沫是一种产品。聚合物发泡材料是一种由聚合物和气体分子组成的气固两相复合材料，由于气泡之间连接方式的不同，这种复合材料既可以是气泡为分散相、聚合物为连续相，也可以是气泡和聚合物均为连续相。分散在聚合物基体中的气泡可以显著地改变聚合物的形态、结构和性能，因而这种兼具固体和气体特性的复合材料具有独特的性能，如质量轻、热导率低、隔声性能好、缓冲性能优良、比强度（拉伸强度/密度）高等，其应用已经深入到人们日常生活的各个方面。

1.1.1 聚合物发泡材料的分类方法

聚合物发泡材料的种类繁多，其分类方法也各式各样，但一般通过材料性能、发泡方法和基体聚合物加以区分。从材料性能加以区分时主要考虑材料尺寸、材料密度、泡孔尺寸、泡孔密度、泡孔形状和物理性质，主要包括板材和片材、高密度和低密度、开孔和闭孔、硬质和软质发泡材料；从发泡方法加以区分时主要包括物理发泡和化学发泡；从加工工艺可以分为自由发泡和结构发泡；从聚合物基体加以区分时主要包括热塑性和热固性发泡材料。高密度热塑性发泡材料的密度一般为未发泡聚合物的 75%~90%，通常作

为耐久性结构件使用；而低密度热塑性发泡材料如片材、板材和型材的密度一般为未发泡聚合物的 1%~20%。

聚合物发泡材料的泡体结构类型如图 1-1 所示。对于开孔发泡材料，聚合物泡体中的泡孔是破的，气泡之间相互连通，泡体中的气相和聚合物相均为连续相；对于闭孔发泡材料，发泡材料泡体中的泡孔是封闭的，孤立地分散在泡体中，只有聚合物相是连续相。结构发泡材料的泡体具有不发泡或少发泡的皮层和发泡的芯层。为了提高发泡材料的物理力学性能，可以采用纤维增强或添加空心球^[1]。

高密度发泡材料和低密度发泡材料中泡孔的形态如图 1-2 所示。图 1-2(a) 为高密度发泡材料中泡孔的常见形态，常见的泡孔为球形、卵球形或者泪珠形，泡孔孤立地分布在聚合物基体中，位于表皮的泡孔尺寸小于位于芯部的泡孔尺寸。图 1-2(b) 和图 1-2(c) 为低密度发泡材料中假想的泡孔立方模型，开孔发泡材料中的泡孔没有壁面，如图 1-2(c) 所示，仅由相互连接的泡孔棱形成泡体的骨架结构，而闭合泡孔则具有完整的壁面，壁面的交叉点构成泡孔棱，通常为五角十二面体，如图 1-2(d) 所示。低密度发泡材料中的泡孔尺寸变化较大，跨度通常在一倍之间，小泡孔位于大泡孔之间，被大的泡孔所扭曲^[2]。

1.1.2 聚合物发泡材料的发展历程

第二次世界大战期间和之后，聚合物发泡技术在欧洲和北美得到了迅速发展，日本在 20 世纪 60 年代加入了开发聚合物发泡材料的行列，我国也于 20 世纪 70 年代开展了聚合物发泡材料的研究。如今聚合物泡沫已经成为聚合物工业的一个重要分支。挤出、注塑、吹塑、滚塑是当前聚合物发泡材料的主要成型方法。其中，挤出发泡属于连续性生产方法，生产效率高，易于实现工业化，占据着低密度发泡材料生产的支配地位，是生产低密度发泡片材、板材和型材的主要方法；吹塑亦占有少量的份额；注塑是生产高密度发泡材料的主要方法；滚塑亦占有少量的份额，并且是一种具有良好

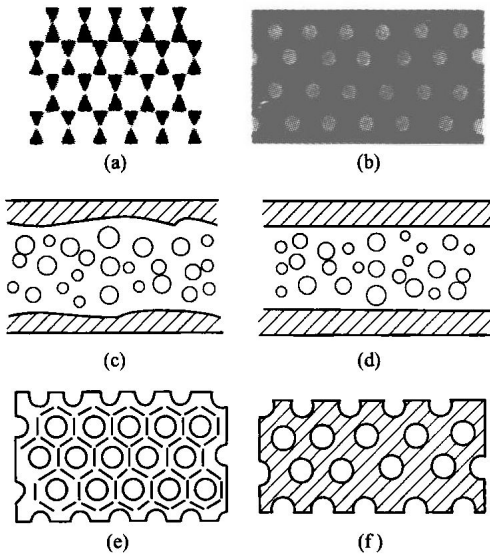


图 1-1 泡体结构示意图

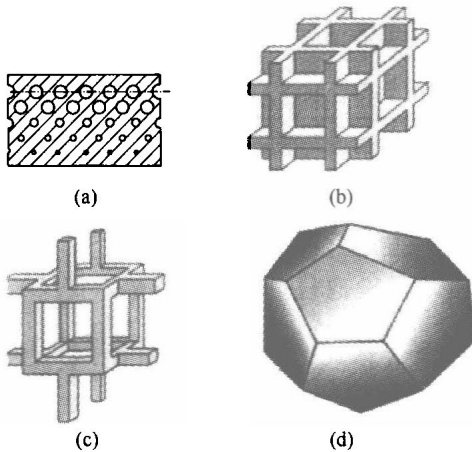


图 1-2 泡孔形态示意图

发展前景的成型方法。表 1-1 提供了一些聚合物发泡材料的通用制备方法，表 1-2 则给出了一些聚合物发泡材料发展过程中的重要转折点^[2]。

表 1-1 聚合物发泡材料的通用制备方法

聚合物	制备方法
热塑性塑料	挤出发泡、注塑发泡、珠粒发泡、滚塑发泡、模压发泡等
热固性塑料	反应发泡、反应模塑发泡、反应注射模塑发泡(RIM)等

表 1-2 聚合物发泡材料发展过程中的重要转折点

年代	内容	发明者
1931	PS 泡沫	Munters 和 Tandberg
1937	PU 泡沫	Otto Bayer
1941	PE 泡沫	Johnson F L
1944	挤出 PS 泡沫	Dow Chemical
1945	硬质 PU 泡沫	Germany
1952	软质 PU 泡沫	Germany
1954	可发性珠粒	Stastney 和 Goeth
1959	硬质 PU 泡沫产品	ICI
1962	PS 泡沫注射模塑	Rubens
1967	双螺杆发泡	Spa L M P
1968	硬质异氰酸酯泡沫塑料	ICI
1972	挤出 PP 泡沫塑料	Parrish R G
1982	储料罐挤出发泡	Collins F
1984	PP 模压发泡制品	Japan Styrene Paper
1990	PET 挤压泡沫	Shell/Petlite

1.1.3 聚合物发泡材料的应用领域

聚氨酯 (PU) 发泡材料、聚苯乙烯 (PS) 发泡材料、聚烯烃 (PP、PE 及共混物) 发泡材料、聚氯乙烯 (PVC) 发泡材料是最主要和应用最为广泛的聚合物发泡材料, 其他如聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 发泡材料、木塑发泡材料、可生物降解发泡材料等在某些领域也展现出了良好的应用前景^[3]。

PU 发泡材料包括软质和硬质发泡材料两种, 产品类型包括块状料、喷涂制品和模制品三种。软质 PU 发泡材料具有优良的弹性和形变回复特性, 广泛应用于座椅缓冲、包装、运动休闲等领域; 而硬质发泡材料具有刚性和绝热性能, 广泛应用于建筑、家电、运动和汽车等领域。

PS 发泡材料在食品工业应用广泛，挤出的片材可以热成型为托盘，具有刚性好、热强度高等优点。但由于 PS 的阻透性差，因此需要将发泡片材与阻透薄膜共挤以增强其阻透性能。由于在绝热、刚性、可模塑性和可与食品接触性等方面具有优点，PS 珠粒发泡的热饮杯子也一度获得了广泛应用，但未来其大规模应用受到环境法规的限制。包装是 PS 发泡材料的另外一个主要应用领域。PS 刚性高，高发泡后其触感很好，非常适宜于包装应用，XPS 绝热板也已经在建筑上有多年的应用历史。PS 发泡材料的一个最大缺点是其泡孔容易破裂，受到高强度的冲击后回复速度非常慢，限制了其多次重复利用。

聚烯烃发泡材料包括聚乙烯、交联聚乙烯和聚丙烯泡沫塑料等。其主要的应用领域如表 1-3 所示^[3]。

表 1-3 聚烯烃发泡材料的应用市场

发泡材料	应用领域
PE-LD 发泡材料	包装、浮材、娱乐等
X-PE 发泡材料	医疗、运动、汽车等
PP 发泡材料	包装、建筑、汽车、体育、工业等
PE 共混发泡材料	包装、绝热、运动、汽车
微孔 PE-HD 发泡材料	包装、医疗

PVC 发泡材料早在 20 世纪 60 年代就已研制成功，可以通过自由发泡法和广为人知的 Celuka 可控发泡法加以制备，在家具、汽车、建筑等领域早已得到了广泛应用。其他发泡材料如 PET 发泡材料，具有优良的阻透性能、力学性能和尺寸稳定性，在食品包装、建筑、交通和汽车工业具有良好的发展潜力。

1.2 建筑保温材料简述

绝热材料是保温材料与隔热材料的统称。在建筑工业中，约定俗成地将用于控制室内热量外流的材料叫做保温材料，防止室外热量进入室内的材料叫做隔热材料。

按照形态分类，常用的保温绝热材料又可分为纤维状、多孔状（微孔、气泡）、粒状、层状等多种。按其成分分类，常用的保温绝热材料可分为有机、无机两大类^[4~9]，如图 1-3 所示。下面就一些比较常见的材料进行简单介绍。

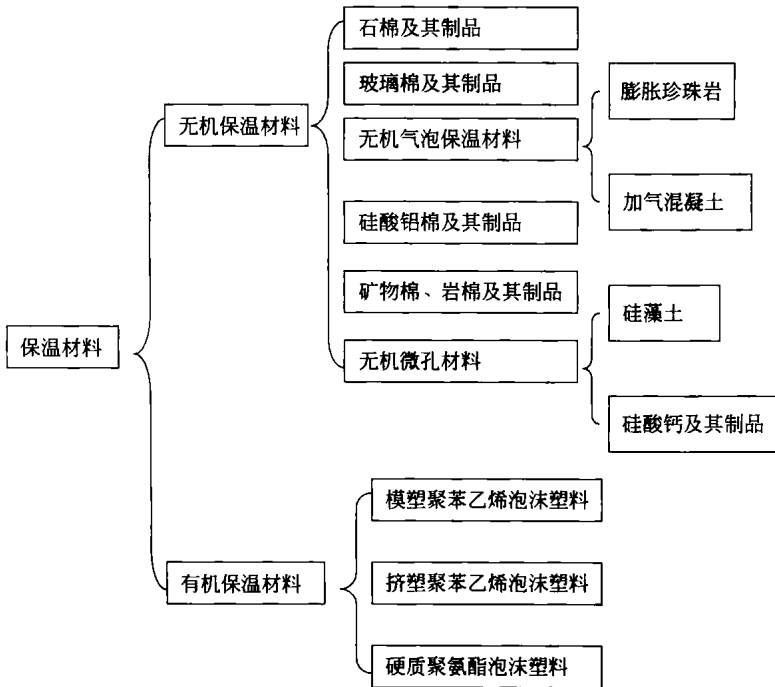


图 1-3 建筑保温材料的分类

1.2.1 无机保温材料

1.2.1.1 石棉

石棉又称“石绵”，是天然的、纤维状的硅酸盐类矿物质的总称。指具有高抗张强度、高挠性、耐化学和热侵蚀、电绝缘和具有可纺性的硅酸盐类矿物产品。它下辖 2 类共计 6 种矿物（有蛇纹石石棉、角闪石石棉、阳起石石棉、直闪石石棉、铁石棉、透闪石石棉）。石棉由纤维束组成，而纤维束又由很长很细的能相互分离的

纤维组成。石棉具有高度耐火性、电绝缘性和绝热性，是重要的防火、绝缘和保温材料^[4]。

中国周代已能用石棉纤维制作织物，因沾污后经火烧即洁白如新，故有火浣布或火浣布之称。目前石棉制品或含有石棉的制品有近3000种，主要用于机械传动、制动以及保温、防火、隔热、防腐、隔声、绝缘等方面，其中较为重要的是汽车、化工、电器设备、建筑业等制造部门。

建筑上常用石棉水泥制品，常见的如石棉水泥管、石棉水泥瓦和石棉水泥板和各种石棉复合板等。这类制品的石棉用量占石棉总消耗量的75%以上。随着涂料工业的发展，各种彩色石棉瓦、彩色石棉板等将为建筑行业提供更优质的材料。石棉板用于建筑物的隔热、隔声墙板等。生产石棉水泥制品一般选用硬结构的针状棉。

由于石棉纤维能引起石棉肺、胸膜间皮瘤等疾病，许多国家选择了全面禁止使用这种危险性物质，其他一些国家正在审视石棉的危险^[5,6]。

1.2.1.2 玻璃棉

玻璃棉是将熔融玻璃纤维化，形成棉状的材料，属于玻璃纤维中的一个类别，是一种无机质纤维。

玻璃棉采用石英砂、石灰石、白云石等天然矿石为主要原料，配合一些纯碱、硼砂等化工原料熔成玻璃。在融化状态下，借助外力吹制式甩成絮状细纤维，纤维和纤维之间为立体交叉，互相缠绕在一起，呈现出许多细小的间隙。这种间隙可看作孔隙。因此，玻璃棉可视为多孔材料，具有良好的绝热、吸声性能^[5]。

玻璃棉包括短棉和超细棉两种。玻璃棉在高温、低温下能保持良好的保温性能；具有良好的弹性恢复力；具有良好的吸声性能，对各种声波、噪声均有良好的吸声效果；化学稳定性好，无老化现象，长期使用性能不变；产品厚度、密度和形状可按用户要求加工。

短棉可以制成玻璃棉毡、卷毡，用于建筑物的隔热和隔声，通