



普通高等教育“十二五”规划教材




[高分子材料与工程专业系列教材]

高分子材料与加工

Polymer

Materials and Processing

温变英 主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料与加工/温变英主编; 温变英, 王佩璋编
著. —北京: 中国轻工业出版社, 2011. 3

高分子材料与工程专业系列教材

ISBN 978-7-5019-7963-9

I. ①高… II. ①温… ②王… III. ①高分子材料—高等学校—教材 IV. ①TB324

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 237753 号

责任编辑: 郭雪娇

策划编辑: 赵红玉 责任终审: 滕炎福 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 宋振全 责任校对: 晋洁 责任监印: 吴京一

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经销: 各地新华书店

版次: 2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 16.5

字数: 401 千字

书号: ISBN 978-7-5019-7963-9 定价: 38.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

100668J1X101ZBW

前 言

合成高分子材料品种繁多、用途广泛、发展迅速。高分子材料只有经过加工成型才能成为有用制品，而在加工过程中又必须使用到各种助剂以提高其加工性能和使用性能，其中涉及较多高分子材料、助剂、聚合物加工流变学等多方面的知识。随着重基础、宽专业概念的强化，高等院校专业课的学时不断被压缩；加上学科的融合，其他非高分子材料专业的学生，如复合材料、材料物理与化学、无机非金属材料、应用化学等专业的学生也需要了解高分子材料及其加工方面相关的背景知识。因此，编写一本简洁、全面地介绍高分子材料特性及主要加工原理和方法的教材非常必要。

本教材将《高分子材料》、《塑料助剂》、《高分子材料加工原理》等知识进行整合，去其冗长，选取其必要的概念、原理和知识点进行重新编辑，使相关知识条理化、系统化，全面介绍了聚合物树脂从材料到生产的全部过程，力求为教师和学生的使用提供方便。近年来，高分子材料的成型方法不断推陈出新，涌现出了一批新的加工技术，本书也对这些新技术进行了简介。此外，因大量高分子材料应用带来的环境问题已是不争的事实，为了培养学生的环保意识与资源意识，本教材特意增加了高分子材料循环利用的内容。

本教材既可作为高分子材料与工程专业的专业课教材，也可作为其他材料专业，如复合材料、材料物理与化学、无机非金属材料、应用化学以及计算机辅助模具设计等专业的选修课教材。

本书第1章、第2章、第3章、第4章、第8章由温变英教授编写，第5章、第6章、第7章由王佩璋教授编写，全书由温变英教授统稿。限于篇幅，书末仅列出了主要参考文献，未能将所有参考文献一一列出，在此对所有作者一并致谢，并请求未能列出的作者谅解。由于我们编写教材的经验不足及水平有限，加上时间仓促，书中难免有疏漏、不妥或错误之处，敬请读者不吝指正。

本教材得到北京工商大学优秀教材建设基金的资助，谨此致谢。

编者

2010年11月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 高分子材料的发展与应用	1
1.1.1 合成高分子材料及其类型	1
1.1.2 高分子材料的发展和高分子科学的建立	2
1.2 高分子加工工业及其发展	3
1.2.1 高分子材料加工成型的过程和主要方法	3
1.2.2 高分子材料加工成型的发展概况	4
第2章 高分子材料概论	5
2.1 高分子材料的基本性能	5
2.1.1 力学性能	5
2.1.2 热性能	9
2.1.3 电学性能	11
2.1.4 光学性能	14
2.1.5 渗透性能	15
2.1.6 吸水性	15
2.1.7 化学性能	15
2.2 高分子材料的成型性能	17
2.2.1 高分子材料的熔融性能	18
2.2.2 高分子材料的流变性能	19
2.2.3 高分子材料的可加工性	31
2.3 高分子材料加工中结构的变化	33
2.3.1 取向	33
2.3.2 结晶	37
2.3.3 接枝和交联	39
2.3.4 降解	40
思考题	42
第3章 物料的混合与配制	44
3.1 添加剂概论	44
3.1.1 常用助剂及其作用原理	44
3.1.2 助剂选用中需要注意的问题	49
3.1.3 助剂的发展	50
3.2 配方设计	50
3.2.1 配方设计的依据	50
3.2.2 配方设计的原则和步骤	51

3.2.3	配方的设计方法	52
3.3	混合过程和混合原理	55
3.3.1	混合的类型	55
3.3.2	混合机理	55
3.3.3	混合效果的评价	57
3.4	配制方法及其设备	58
3.4.1	物料配制的一般方法	58
3.4.2	混合设备	59
3.4.3	混炼设备	61
3.4.4	粉碎或造粒	65
	思考题	67
第4章	高分子材料成型加工技术	68
4.1	挤出成型	68
4.1.1	挤出成型设备	68
4.1.2	挤出加工原理	75
4.1.3	挤出工艺	78
4.1.4	挤出成型新技术	84
4.2	注射成型	88
4.2.1	注塑机	88
4.2.2	注射模具	96
4.2.3	注射成型原理	97
4.2.4	注射成型工艺	103
4.2.5	注射成型新技术	108
4.3	中空吹塑成型	113
4.3.1	注射吹塑	113
4.3.2	挤出吹塑	115
4.3.3	中空吹塑工艺过程的控制	115
4.3.4	中空吹塑成型新技术	117
4.4	压延成型	119
4.4.1	压延成型设备	120
4.4.2	物料在压延机辊筒间隙中的流动分析	123
4.4.3	压延成型工艺及其控制	126
4.4.4	压延成型的进展	131
4.5	压制成型	133
4.5.1	模压料的成型工艺特性	134
4.5.2	模压成型设备	135
4.5.3	模压成型过程与操作	138
4.5.4	模压成型工艺条件	140
4.5.5	热固性塑料的传递模塑	142

4.6 泡沫材料成型	144
4.6.1 泡沫塑料的发泡原理	144
4.6.2 泡沫塑料发泡方法	145
4.6.3 泡沫塑料成型方法	148
4.6.4 发泡成型新技术	148
4.7 其他成型方法	150
4.7.1 热成型	150
4.7.2 铸塑成型	157
思考题	162
第5章 通用塑料及其加工	164
5.1 聚乙烯	164
5.1.1 聚乙烯的结构特征	164
5.1.2 聚乙烯的性能	165
5.1.3 聚乙烯的成型加工	166
5.1.4 聚乙烯的应用	169
5.2 聚丙烯	170
5.2.1 聚丙烯的结构特征	170
5.2.2 聚丙烯的性能	172
5.2.3 聚丙烯的成型加工	173
5.2.4 聚丙烯的应用	175
5.3 聚氯乙烯	176
5.3.1 聚氯乙烯的结构特征	176
5.3.2 聚氯乙烯的性能	176
5.3.3 聚氯乙烯的品级	178
5.3.4 聚氯乙烯的成型加工	180
5.3.5 聚氯乙烯的应用	182
5.4 聚苯乙烯	183
5.4.1 聚苯乙烯的结构特征	183
5.4.2 聚苯乙烯的性能	184
5.4.3 聚苯乙烯的成型加工	185
5.4.4 聚苯乙烯的应用	187
5.5 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂	188
5.5.1 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂的结构特征	188
5.5.2 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物的性能	189
5.5.3 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物的品级	190
5.5.4 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物的成型加工	191
5.5.5 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物的应用	192
思考题	193

第 6 章 通用工程塑料及其加工	194
6.1 聚酰胺	194
6.1.1 聚酰胺的结构特征	195
6.1.2 聚酰胺的性能	196
6.1.3 聚酰胺的成型加工	199
6.1.4 聚酰胺的应用	200
6.2 聚碳酸酯	200
6.2.1 聚碳酸酯的结构特征	200
6.2.2 聚碳酸酯的性能	201
6.2.3 聚碳酸酯的成型加工	202
6.2.4 聚碳酸酯的应用	203
6.3 聚甲醛	204
6.3.1 聚甲醛结构特征	204
6.3.2 聚甲醛的性能	206
6.3.3 聚甲醛的加工	207
6.3.4 聚甲醛的应用	209
6.4 热塑性聚酯	209
6.4.1 热塑性聚酯的结构特征	210
6.4.2 热塑性聚酯的性能	210
6.4.3 热塑性聚酯的加工	212
6.4.4 热塑性聚酯的应用	215
6.5 聚苯醚	216
6.5.1 聚苯醚的结构特征	216
6.5.2 聚苯醚的性能	216
6.5.3 聚苯醚的加工	218
6.5.4 聚苯醚的应用	220
思考题	220
第 7 章 通用热固性塑料	221
7.1 酚醛树脂及塑料	221
7.1.1 酚醛树脂的类型和结构	221
7.1.2 酚醛树脂的性能	222
7.1.3 酚醛塑料	222
7.1.4 酚醛塑料的加工	225
7.1.5 酚醛塑料的应用	225
7.2 氨基树脂及塑料	226
7.2.1 脲醛树脂及塑料	226
7.2.2 三聚氰胺甲醛树脂及塑料	228
7.3 环氧树脂及塑料	229
7.3.1 环氧树脂及其结构	229

7.3.2 环氧塑料及其性能	230
7.3.3 环氧塑料的加工	231
7.3.4 环氧塑料的应用	232
7.4 不饱和聚酯树脂	232
7.4.1 不饱和聚酯树脂的结构	232
7.4.2 不饱和聚酯树脂的组成	233
7.4.3 不饱和聚酯树脂的固化	233
7.4.4 不饱和聚酯及其加工	234
7.4.5 不饱和聚酯的应用	234
思考题	234
第8章 高分子材料的循环利用	235
8.1 概述	235
8.1.1 高分子材料与环境	235
8.1.2 废旧高分子材料的处理	237
8.2 废旧高分子材料回收的预处理	239
8.2.1 废旧高分子材料的分离	239
8.2.2 减小废旧高分子材料尺寸的方法	244
8.3 高分子材料循环利用原理和技术	246
8.3.1 高分子材料循环利用中的一些基本概念	246
8.3.2 高分子材料循环利用技术	247
思考题	250
参考文献	252

第1章 绪 论

1.1 高分子材料的发展与应用

高分子材料也称为聚合物材料，是以聚合物为基体，再配有其他添加剂（助剂）所构成的材料。所谓聚合物是由许多结构相同的、简单的单元通过共价键重复连接而成的相对分子质量很大的化合物。高分子材料包括天然高分子材料和合成高分子材料。自然界中的棉、麻、丝、毛、木材、皮革、天然橡胶、淀粉等都是性能优异的天然高分子材料。人类使用天然高分子材料的历史可以追溯到远古时代，直至今日，天然高分子材料仍然是人们生活中不可或缺的材料。合成高分子材料是材料领域中的新秀，它的出现带来了材料领域中的重大变革。由于原料来源丰富，制造方便，品种繁多，用途广泛，现已形成一个庞大的高分子材料工业，其应用遍及现代工业的各个领域和人民的衣食住行，有些甚至成为国民经济、国防建设和尖端科学中不可替代的材料，世界各国都毫无例外地把高分子材料作为重点学科来加以发展，其在材料领域中的地位日益突出，掌握高分子材料的知识至关重要。

1.1.1 合成高分子材料及其类型

尽管天然高分子材料有许多其他材料无可比拟的优点，但受到来源、强度以及加工方法等方面的制约，在合成高分子材料工业中仅占很少的比例，合成高分子材料才是高分子材料的主流，因此，本教材只将合成高分子材料及其主要的加工方法作为讲解对象。

合成高分子材料是通过聚合方法使具有反应能力的单体之间发生聚合反应而制备的。所谓聚合反应是指将单体连成聚合物的具体化学反应，如加成聚合反应、缩合聚合反应、配位聚合反应等，其本质涉及聚合反应机理；而聚合方法则是指实现这些聚合反应所需要的手段，如本体聚合、溶液聚合、乳液聚合、界面聚合等，其本质是工业技术。具有聚合反应能力的单体只有通过合理可行的聚合方法才能变成聚合物，故二者互为条件、互相依存。高分子材料品种和数量的不断增加是这两种因素共同发展的结果。随着高分子材料家族的不断扩大，其类型逐渐增多。一般而言，不同类型的高分子材料在结构、性能和加工方法上有较大区别，同时，材料也因分类方法的不同而归属不同，所以，掌握高分子材料的分类方法很有必要。高分子材料有多种分类方法，常见的如下文所示：

- ①按生成聚合物的化学反应分为加聚物和缩聚物；
- ②按聚合物的主链结构分为碳（均）链聚合物、杂键聚合物和元素有机聚合物；
- ③按聚合物的物理构象分为结晶性聚合物和非结晶性聚合物；
- ④按聚合物的热行为分为热塑性聚合物和热固性聚合物；
- ⑤按聚合物的极性分为极性聚合物和非极性聚合物；
- ⑥按聚合物的性质分为塑料、橡胶、纤维、涂料和黏合剂等；
- ⑦按用途分为通用塑料、工程塑料、特种塑料、通用橡胶、特种橡胶等；

⑧按单体类型分为聚烯烃类树脂、聚乙烯基树脂、聚苯乙烯类树脂、氟树脂、聚酰胺类树脂、聚醚类树脂以及热塑性聚酯等；

⑨按聚合物的成分分为均聚物、共聚物和复合物等。

1.1.2 高分子材料的发展和高分子科学的建立

高分子材料的发展大致经历了三个时期，即天然高分子材料的利用与加工，天然高分子材料的改性和合成，高分子材料的工业生产（高分子科学的建立）。19世纪之前仅限于天然高分子材料的直接利用与机械加工。由天然高分子化学改性或由人工合成探索新高分子材料的近代高分子材料研究始于19世纪中叶。1844年，Goodyear发明了天然橡胶硫化技术，开创了近代高分子材料的研究。1868年出现了以樟脑为增塑剂用硝基纤维素酯制备赛璐璐的技术，从而出现了塑料。1890年出现了用硝基纤维素酯以乙醇做溶剂进行湿法纺丝的成纤技术，从而出现了人造纤维。1895年左右出现了用帆布增强硫化橡胶制轮胎的技术，是首次出现的近代技术上的复合材料。1907年出现了酚醛树脂合成技术，这是工业化生产高分子的开始，标志着人类进入了合成高分子材料时代。

天然高分子材料的工业应用和合成高分子材料的出现，使人们对这些材料的认识不断深入，催生了高分子科学的诞生。1833年，Berzelius提出“Polymer”一词，其含义为包括以共价键、非共价键连接的聚集体。1870年开始意识到纤维、淀粉和蛋白质是大的分子。1907年提出分子胶体概念，人们对高分子结构的认识还处于蒙昧阶段。直到1920年，H. Staudinger发表了他划时代的著作“论聚合”，论证了聚合过程是大量的小分子自己结合起来的过程，才使人们突破了胶体缔合的思维桎梏。1932年，Staudinger进一步提出了溶液黏度与相对分子质量的关系式，相对分子质量的准确测量等实验事实有力地证明了大分子的存在，标志着高分子科学的诞生。随着高分子概念的确立，一大批合成材料被生产出来并迅速商品化。如1931~1940年期间，作为塑料的聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚三氟氯乙烯、高压聚乙烯、聚偏氯乙烯、聚乙烯醇缩丁醛的生产；1938~1940年，聚酰胺和聚酯纤维的生产以及1931~1942年氯丁橡胶、丁基橡胶和丁苯橡胶的生产。20世纪50年代是高分子合成大发展的时期，其标志性成果是德国人齐格勒（Karl Ziegler）与意大利人纳塔（Giulio Natta）发明了配位阴离子聚合，分别用金属络合催化剂合成了聚乙烯与聚丙烯。这一时期前后，几乎所有被称为大品种的高分子（包括有机硅等）都陆续投入了生产。20世纪60年代是高分子物理大发展时期。1960~1969年，结晶高分子、高分子黏弹性、高分子流变学的研究进一步开展，各种近代研究方法，如NMR，GPC，IR，热谱，电镜等手段在分子结构研究中逐渐应用。20世纪70年代，高分子工程科学得到大发展，高分子材料的生产走向高效化、自动化和大型化，表现为大型聚合反应设备及新工艺的使用和大型加工设备的出现，同时，高分子共混物及共混理论迅速发展。20世纪80年代，高性能材料和高分子的功能被广泛研究，精细高分子、功能高分子、生物医学高分子得到发展。20世纪90年代后，高分子材料发展的主要趋势是高性能化、高功能化、复合化、精细化和智能化。

高分子科学的研究成果孕育和保证了高分子材料的开发，各种新型高分子材料的研制和开发又反过来推动和促进了高分子科学的深化，使其发展到更高的水平。现在高分子科学已经形成了高分子化学、高分子物理、高分子工程三个领域。其中，高分子化学是高分子科学的反应理论基础，主要研究高分子化合物的分子设计、合成、改性等内容，担负着

为高分子科学提供新化合物、新材料的任务。高分子物理是高分子科学的结构理论基础，主要研究高分子材料的结构与性能的关系，通过研究分子运动来揭示材料结构与性能之间内在联系以及它们的基本规律，从而对高分子材料的合成、成型加工、测试、改性提供理论依据。高分子工程包括聚合反应工程和聚合物加工工程，前者主要研究聚合反应方法、聚合工艺，后者主要研究各种材料所适应的加工方法和加工工艺，二者都是直接为生产服务的，可见，高分子工程是高分子科学和高分子工业之间的衔接点。随着生产和科学技术的发展，材料要适应各种各样新的要求，高分子化学、高分子物理、高分子工程这三个分支不断交融、相互促进，使高分子科学发展成为一门研究内容极其丰富，研究范围更加广阔的整体学科。

1.2 高分子加工工业及其发展

完整的高分子工业体系由高分子合成工业和高分子加工工业两大系统组成。前者通过人工合成的方法，生产具有特定化学组成、链结构及凝聚态结构的高分子化合物，其目的是为加工提供性能可靠的原料；后者则是通过配方设计、混炼加工及挤出造粒等过程，使高分子化合物与各种助剂形成具有高次聚集态结构或织态结构的高分子材料，然后采用各种成型方法，将高分子材料加工成为具有一定形状和使用价值的制品或型材。两个系统相辅相成、相互依赖。任何一种材料，不管它具有多么优异的性能，如果不能被优质、高效、经济地成型加工制造成产品，则它的价值就不能够得到发挥。而一种产品的最终性能，不仅与其材料固有的性能有关，而且在很大程度上依赖这种材料采用的成型加工技术和经历的加工工艺过程。不正确的成型加工方法，不仅得不到预期性能的产品，甚至会破坏原材料的性能。例如，过高的加工温度会引起材料的分解、交联，甚至焦化，这就破坏了原材料的性能。所以，加工环节对保证产品的质量及产率而言至关重要。目前，国际上已不再将高分子材料加工视为单纯的物理成型过程，而是把它看作控制制品结构和性能的中心环节，加工成型正从一项实用技术变成一门应用科学。

1.2.1 高分子材料加工成型的过程和主要方法

高分子材料成型加工就是利用一切可以实施的方法使其成为具有一定外形而又有使用价值的物件或定型材料的过程。

一般制品的生产工序为：①根据制品使用条件及用途，确定所用材料品种及型号；②根据材料加工性能、制品要求及成型特点确定成型方法；③选择成型设备，加工成型模具；④实际加工调试，确定加工成型参数；⑤大批量生产。

大多数情况下，高分子材料加工的过程包括四个阶段：原材料的准备，如聚合物和添加剂的预处理、配料、混合等；使原材料产生变形或流动，并形成所需的形状；材料或制品的固化；后加工和处理，以改善材料或制品的外观、结构和性能。

粉料、粒料、溶液、分散体等是高分子材料常见的形态。成型加工技术不仅要适应被加工物料的形态，而且要适应材料在加工过程中发生的一系列化学或物理变化，故物料形态的不同决定了其成型方法的不同。成型加工通常有以下几种形式：

①聚合物熔体加工 熔体由粉料或粒料熔融而来，是聚合物加工最主要的物料形式，

熔融加工包括了挤出、注射、压延、模压、层压、熔融纺丝、热固性塑料传递模塑、橡胶压出等多种方法，绝大多数的聚合物产品都由这些方法生产；

②聚合物溶液加工 如溶液法纺制化学纤维、流延法制薄膜；油漆、涂料和黏合剂等也大多用溶液法加工；

③类橡胶状聚合物的加工 如采用真空成型、压力成型或其他热成型技术等制造各种容器、大型制件和某些特殊制品，纤维或薄膜的拉伸等；

④低分子聚合物或预聚物的加工 如丙烯酸酯类、环氧树脂、不饱和聚酯树脂以及浇铸聚酰胺等用该技术制造整体浇铸件或增强材料；化学反应法纺制聚氨酯弹性纤维等；

⑤高聚物分散体的加工 如用聚氯乙烯糊以及橡胶乳、聚乙酸乙烯酯乳或其他胶乳等生产搪塑制品、多种胶乳制品、涂料、胶黏剂等；乳液法或悬浮法纺制化学纤维等；

⑥固态聚合物的机械加工 如塑料件的切削加工（车、铣、刨、钻）、黏合、装配；化学纤维的加捻、卷曲、变形等。

限于篇幅，本教材主要讲解聚合物熔体的各种加工方法。

1.2.2 高分子材料加工成型的发展概况

合成高分子材料出现至今只有一百多年的历史，作为一种新材料，其成型加工技术经历了移植、改造和创新三个历史阶段。1870~1920年为移植时期。在这个时期，合成高分子材料刚刚问世，不可能有现成的制品加工技术供采用，因此，首先从金属、玻璃和陶瓷等传统材料的成型加工技术中移植。例如，热塑性塑料的中空吹塑技术，是从玻璃制造的吹瓶技术中移植而来；塑料的压延成型技术是从造纸工业的辊筒加工技术得到启发；塑料浇铸成型技术是借鉴金属的铸造技术。1920~1950年为改造时期。在这一时期，大量聚合物品种相继出现，机械加工工业已能为聚合物制品部门提供多种专用设备，高分子成型加工理论的研究也已取得重大进展，聚合物制品从传统材料的替代品发展为一些工业部门不可缺少的零部件，这一切都促进了将传统材料成型技术和现有成型加工技术改造为高分子材料成型技术的发展。例如，1936年，将生产食品的机器改制成单螺杆挤出机，将金属粉末冶金技术改造为四氟乙烯等难熔塑料的冷压烧结成型技术，将金属的压铸技术，改造为适合热固性塑料的“传递模塑”技术，将搪瓷制品的传统生产技术改造为糊塑料的“搪塑成型”技术。1950年后为创新时期。这一时期，由于出现聚碳酸酯、聚甲醛、聚砜、聚酰亚胺、环氧树脂、不饱和树脂等一大批高性能的工程塑料，而这些工程塑料的成型加工性能又各具特点，加上工业发展对塑料制品精度、性能的要求更高，这两方面都要求塑料成型技术向更高阶段发展。机械加工技术、计算机自动控制技术及成型加工理论研究三方面的进一步发展，使塑料加工技术进入创新时期成为可能。例如，1956年，螺杆式注塑机问世，加上后来双螺杆挤出机的进步，使注射和挤出成型技术进入新的时期。滚塑成型使生产特大型中空容器成为可能，反应注射成型使生产大型注塑制品成为现实，组合式成型技术成为发展趋势。20世纪末，伴随着聚合物工业的快速发展，成型加工技术不断创新，涌现出了一批极有价值的新型加工方法，如可熔芯注射、层状注射、振动挤出、固态挤出等，使聚合物成型加工技术更加多样化、更加先进、更加完善并更易于应用。本教材将用主要篇幅介绍成熟的聚合物加工技术，也将在第4章中花少量的篇幅向读者简要介绍这些新技术。

第 2 章 高分子材料概论

2.1 高分子材料的基本性能

材料的性能是由其组成和结构所决定的，不同的材料具有不同的性能。只有对材料的物性有了准确的认识和理解，才可能对其进行合理的应用。本节主要介绍高分子材料的基本性能（包括力学性能、热性能、电性能、光学性能、渗透性能、化学性能等）及其主要的表征方法。

2.1.1 力学性能

力学性能是材料最重要也是最基本的性能指标，高分子材料也不例外。因结构的特殊性，高分子材料在力学性能上与金属材料 and 无机非金属材料有着显著的不同。

2.1.1.1 高分子材料力学性能的特点

(1) 低强度和较高的比强度

高分子材料的拉伸强度一般为几十 MPa，增强后可以大于 100MPa，比金属材料低得多，但是高分子材料的密度小，只有钢的 $1/6 \sim 1/4$ ，所以其比强度并不比某些金属低。此外，高分子材料的力学性能随自身的相对分子质量以及相对分子质量分布、结晶与取向、支化和交联等的变化而变化，因此，同一高分子材料可能因牌号的不同而导致力学性能产生较大差异。

(2) 高弹性和低弹性模量

高弹性是高分子材料极其重要的性能。橡胶是典型的高弹性材料，其弹性变形率为 $100\% \sim 1000\%$ ，弹性模量仅为 1MPa 左右。高分子材料在高弹态都能表现出一定的高弹性，但并非都可以作为橡胶使用。

(3) 黏弹性

高分子材料的力学性能不仅对温度具有依赖性，而且还对应力作用的时间具有依赖性，表现出黏弹性行为，这种黏弹性又因所施载荷的不同而有静态和动态之分。

所谓静态黏弹性是指高分子材料在静态载荷的作用下所表现出的黏弹性行为，其典型表现是蠕变和应力松弛。蠕变是指在一定的温度和较小的恒定载荷作用下，材料的形变随时间的增加而逐渐增大的现象。应力松弛是在一定的温度和应变保持恒定的条件下，高分子材料内部的应力随时间延长而逐渐衰减的现象。蠕变和应力松弛都与温度有关，它们又都反映高分子材料内部分子的运动情况，因此可利用其对温度的依赖性来研究高分子材料的分子运动和转变。

高分子材料作为结构材料在实际应用时，往往受到交变应力的作用。在交变应力作用下，处于高弹态的高分子，由于分子内摩擦的存在，使其形变的速度跟不上应力变化的速度，从而产生滞后现象，滞后是典型的动态黏弹性行为。由于滞后，每一循环变化中就要

消耗功，称为力学损耗，也称为内耗。

(4) 高耐磨性

由于高分子材料的黏弹特性，在摩擦引起的剪切过程中需要消耗更多的能量，所以，高分子材料具有较高的耐磨性。高分子材料的摩擦因数各不相同，内耗大的高分子材料摩擦因数也较大。表 2-1 列出了常见高分子材料的滑动摩擦因数。

表 2-1 常见高分子材料的滑动摩擦因数

高分子材料	μ	高分子材料	μ
聚四氟乙烯	0.04 ~ 0.15	聚酰胺 66	0.15 ~ 0.40
低密度聚乙烯	0.30 ~ 0.80	聚氯乙烯	0.20 ~ 0.90
高密度聚乙烯	0.08 ~ 0.20	聚偏二氯乙烯	0.68 ~ 1.80
聚丙烯	0.67	聚氯乙炔	0.10 ~ 0.30
聚苯乙烯	0.33 ~ 0.50	丁苯橡胶	0.50 ~ 3.00
聚甲基丙烯酸甲酯	0.25 ~ 0.50	顺丁橡胶	0.40 ~ 1.50
聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.20 ~ 0.30	天然橡胶	0.50 ~ 3.00

从表 2-1 可以看出，塑料的摩擦因数小，有些塑料具有自润滑性能，如聚四氟乙烯，可以被用作轴承垫材料；橡胶的摩擦因数较大，常被用作轮胎和传输带等。

(5) 相对分子质量依赖性

高分子材料的力学性能远低于金属材料，并且随相对分子质量以及相对分子质量分布的变化而变化。一般对同种高分子材料而言，相对分子质量高的强度较高，相对分子质量分布宽的韧性较好。

2.1.1.2 高分子材料力学性能的特征

材料性能的评价是一个非常复杂而庞大的课题。为了使材料的性能评价规范化和具有可比性，国际标准化组织 (ISO) 不断制订各种统一的国际标准，各国也参照这些国际标准，结合本国的实际情况制订了各自的国家标准，例如，我国的 GB 系列和美国的 ASTM 系列标准。这些标准对试验方法、测试条件以及所使用的仪器都做出了明确的规定，从而使材料的评价更加客观和科学，而且在使用和交流上更加方便。

衡量材料力学性能的指标一般包括强度和硬度两个方面。强度是材料抵抗外力破坏的能力。硬度是衡量材料表面抵抗机械压力能力的一种指标。对于各种破坏力，则有不同强度指标；同样，硬度也因测量方法的不同而有不同的表达方法。下文介绍了一些常见的力学性能指标。

(1) 拉伸强度

拉伸强度又称为抗张强度、抗拉强度，是指在规定的试验温度、湿度和拉伸速度下，沿试样的纵轴方向施加拉伸载荷，测定试样直至破坏时单位面积上所承受的最大载荷。拉伸强度按式 (2-1) 计算：

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot d} \times 10^{-6} \tag{2-1}$$

式中 σ ——拉伸强度，MPa

F ——最大负荷或屈服负荷, N

b ——试样宽度, m

d ——试样厚度, m

断裂伸长率按式(2-2)计算:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中 ε ——断裂伸长率, %

L_0 ——试样原始标距, m

L ——试样断裂时标线间距离, m

由于在整个拉伸过程中, 聚合物的应力-应变关系不呈线性关系, 只有当变形很小时, 聚合物才可视为虎克弹性体, 因此, 弹性模量(即杨氏模量)通常由拉伸初始阶段的应力与应变比例计算, 如式(2-3)所示:

$$E = \frac{(\Delta F/bd)}{(\Delta L/L_0)} \quad (2-3)$$

式中 ΔF ——形变较小时的载荷, N

ΔL ——与 ΔF 相对应的变形值, m

(2) 冲击强度

冲击强度又称为抗冲强度, 是指标准试样受高速冲击作用断裂时, 单位断面面积(或单位缺口长度)所消耗的能量。它描述了高分子材料在高速冲击作用下抵抗冲击破坏的能力和材料的抗冲击韧性, 其测量值与实验方法和实验条件有关。按试样的加持方式分为悬臂梁和简支梁两种, 按试样的形状有缺口和无缺口之分。

无缺口试样冲击强度按式(2-4)计算:

$$\alpha = \frac{E}{b \cdot d} \times 10^{-3} \quad (2-4)$$

式中 α ——冲击强度, kJ/m^2

E ——试样破断所消耗的能量, J

b ——试样宽度, m

d ——试样厚度, m

缺口试样冲击强度按式(2-5)计算:

$$\alpha_k = \frac{E_k}{b_k \cdot d} \times 10^{-3} \quad (2-5)$$

式中 α_k ——缺口试样简支梁冲击强度, kJ/m^2

E_k ——试样破断所吸收的冲击能量, J

b_k ——试样缺口底部剩余宽度, m

d ——试样厚度, m

(3) 弯曲强度

弯曲强度又称为抗弯强度, 是指在规定的试验温度、湿度和下压速度下, 对试样在两个支点的中点施加集中载荷, 使试样变形或直至破裂过程中承受的最大弯曲应力。

弯曲强度按式(2-6)计算:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bd^2} \quad (2-6)$$

式中 σ ——弯曲强度, MPa

F ——最大负荷, N

l ——试样跨度, m

b ——试样宽度, m

d ——试样厚度, m

弯曲模量 (E_f) 按式 (2-7) 计算:

$$E_f = \frac{Fl^3}{4bd^3\delta} \quad (2-7)$$

式中 δ ——挠度, m, 是试样着力处的位移

(4) 压缩强度

压缩强度是指在规定的试验温度、湿度和压缩速度下, 在试样上施加压缩载荷直至破裂 (对脆性材料而言) 或产生屈服的强度 (对非脆性材料而言)。压缩所施加压力的方向与拉伸正好相反, 压缩强度的计算方法同拉伸强度。

(5) 疲劳强度

疲劳强度是指在一个静态破坏力而有小量交变循环的环境下, 使材料破坏的强度。疲劳载荷的来源有拉压、弯曲、扭转、冲击等。疲劳强度按式 (2-8) 计算:

$$\sigma_a = \sigma - k \lg N \quad (2-8)$$

式中 σ_a ——疲劳强度, MPa

σ ——静态强度, MPa

k ——系数

N ——交变应力的反复次数

实验表明, 高分子材料在周期性交变应力作用下会在低于静态强度的应力下破裂。多数高分子材料存在疲劳极限, 当疲劳强度小于疲劳极限时, 即使 $N \rightarrow \infty$, 材料也不破裂, 这种情况下可认为材料的疲劳寿命为无限大。一般热塑性聚合物的疲劳极限为其静强度的 1/4; 增强高分子材料的疲劳极限要高一些, 例如, 聚甲醛和聚四氟乙烯的此值可达到 0.4 ~ 0.5。

(6) 摩擦与磨耗

摩擦和磨耗也是高分子材料重要的力学性能, 这种性能对橡胶制品而言更为重要。摩擦和磨耗是同一现象的两个方面, 当相互摩擦接触面黏合和嵌入的形变因剪切而使材料从较软一侧的表面脱落时就形成磨耗。由于高分子材料的黏弹性变形机理与金属有很大的不同, 因此, 摩擦力正比于负荷的 Amontons 定律不适用于高分子材料。一般而言, 对发生黏弹性形变的高分子材料, 其摩擦因数符合式 (2-9):

$$\mu = KF^{n-1} \quad (2-9)$$

式中 μ ——摩擦因数

K ——与材料特性有关的常数

F ——负荷

n ——与摩擦面实际接触面积有关的负荷修正指数

$\frac{2}{3} < n < 1$, 例如, 对聚四氟乙烯, $n = 0.85$ 。从式 (2-9) 可以看出, 高分子材料的摩擦因数随负荷的增加而减小。

磨耗过程常决定于材料表面的性质, 高分子材料的磨耗也同样由其形变和破坏特性所决定。磨耗系数和耐磨性的定义分别由式 (2-10) 和式 (2-11) 所示:

$$A' = \frac{V}{DF} \quad (2-10)$$

$$\gamma = \frac{A'}{\mu} \quad (2-11)$$

式中 A' ——磨耗系数

V ——因磨耗从试样表面上磨去材料的体积

D ——滑动距离

F ——负荷

γ ——耐磨性

μ ——摩擦因数

(7) 邵氏硬度

邵氏硬度是指在规定的压力、时间下计算压痕器的压针所压入的深度。邵氏压痕器可分为两类: A 型 (圆台型压头, 施加负荷质量为 1.0kg, H_A) 和 D 型 (圆锥型压针, 施加负荷质量为 5.0kg, H_D), 压下时间为 15s, A 型适用于软质塑料, D 型适用于半硬质塑料。硬度计读数度盘为 0 ~ 100 分度, 测定范围在 20 ~ 90 之间有效。当用 A 型测出超过 95% 量程时, 应改用 D 型, 当 D 型测出超过 95% 量程时, 则需要改用洛氏压痕器。

(8) 洛氏硬度

压头为满足一定硬度要求的钢球。用规定的压头, 先施加初试验力, 再施加主试验力, 然后返回到初试验力, 用前后两次初试验力作用下压头的压入深度差求得的值作为洛氏硬度。有 R、L、M、E 四种试验条件, 分别称为 R、L、M、E 洛氏硬度标尺, 相应的硬度记为 HR R + 数值, HR L + 数值, HR M + 数值, HR E + 数值。根据材料软硬程度选择适宜的标尺, 尽可能使洛氏硬度值在 50 ~ 115 之间。

2.1.2 热性能

高分子材料是热的不良导体, 这是因为高分子材料一般是靠分子间力结合的, 所以其导热性比靠自由电子热运动导热的金属材料要低得多。与高分子材料热性能相关的指标介绍如下。

(1) 热导率

热导率又称导热系数, 是材料沿其长度或通过其厚度传导热能的速率, 其数值由式 (2-12) 计算:

$$\lambda = \frac{Qd}{A\Delta T} \quad (2-12)$$

式中 λ ——热导率, $W/(m \cdot K)$

d ——样品厚度, m

A ——样品面积, m^2