

北京高等教育精品教材

高分子 材料加工

(第二版)

温变英◎主编
陈雅君 王佩璋◎参编

GAOFENZI
CAILIAO
JIAGONG



北京高等教育精品教材

高分子材料加工

(第二版)

温变英 主编
陈雅君 王佩璋 参编

图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料加工/温变英主编. —2 版. —北京: 中国轻工业出版社, 2016. 6

北京高等教育精品教材

ISBN 978 - 7 - 5184 - 0947 - 1

I. ①高… II. ①温… III. ①高分子材料—高等学校—教材②高分子材料—生产工艺—高等学校—教材 IV. ①TB324②TQ316

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 107571 号

责任编辑: 杨晓洁

策划编辑: 王 淳

责任终审: 孟寿萱

封面设计: 锋尚设计

版式设计: 宋振全

责任校对: 燕 杰

责任监印: 马金路

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: 北京君升印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2016 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 22

字 数: 507 千字

书 号: ISBN 978 - 7 - 5184 - 0947 - 1 定价: 42.00 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

150322J1X201ZBW

前 言

(第二版)

本书第一版将“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,选取其必要的概念、原理和知识点等,以简洁的风格全面介绍了聚合物树脂从材料到生产的全部过程。自2011年出版以来,被多所院校选用,多次重印,并且于2013年荣获北京高等教育精品教材。

在这几年的使用过程中也发现,第一版教材更适合于高分子合成、包装工程、复合材料、材料物理与化学、材料科学与工程、应用化学以及计算机辅助模具设计等非高分子加工类专业使用。由于大量压缩了篇幅,致使有些原理不能详述,有些方法也不能呈现,使得第一版教材对高分子加工类专业而言略显不足。因此,第二版着重扩充了成型加工方面的内容以满足高分子材料加工专业的教学需要。

此外,近年来高分子材料的成型方法进步显著,传统的加工技术得以完善,新的加工手段不断出现,为了更好地适应教学需求,使专业课教学跟上行业发展的步伐,第二版教材在第一版基础上也对新技术部分进行了充实。

对应于第一版,第二版教材主要调整的内容如下:

(1) 在第2章高分子材料性能部分增加了测试标准,更加规范,也方便读者查阅,增加了教材的实用性;

(2) 在第3章混炼方法部分增加了磨盘挤出,粒化部分增加了水下切粒;

(3) 将原第4章拆分成第4章至第10章,较为完整地介绍了塑料成型的主要方法,并对一些新的发展和技术进行了简介;

(4) 将原第5章至第7章简化整合为第11章;

(5) 对原第8章的内容进行调整充实,新编为第12章。

本书扩充的部分内容由陈雅君博士编写,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。

本书既可作为高分子材料与工程专业的专业必修课教材,也可作为其他相关或相近专业的选修课教材;还可以供相关专业工程技术人员参考。

本教材得到北京工商大学示范课程建设基金的资助,谨此致谢。

编 者

2016.3

目 录

第1章 绪论	1
1.1 高分子材料及高分子工业	1
1.1.1 高分子材料的类型	1
1.1.2 高分子工业的组成和发展	1
1.2 高分子加工工业及其发展	2
1.2.1 高分子材料加工成型的过程和方法	3
1.2.2 高分子材料成型加工的发展概况	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	10
2.1.3 电学性能	12
2.1.4 光学性能	15
2.1.5 渗透性能	16
2.1.6 吸水性	16
2.1.7 化学性能	17
2.2 高分子材料的成型性能	18
2.2.1 高分子材料的熔融性能	19
2.2.2 高分子材料的流变性能	20
2.2.3 高分子材料的可加工性	33
2.3 高分子材料加工中结构的变化	35
2.3.1 取向	35
2.3.2 结晶	38
2.3.3 接枝和交联	40
2.3.4 降解	41
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	51
3.2 配方设计	51
3.2.1 配方设计的依据	51
3.2.2 配方设计的原则和步骤	52
3.2.3 配方的设计方法	53

3.3	混合过程和混合原理	56
3.3.1	混合的类型	56
3.3.2	混合机理	56
3.3.3	混合效果的评价	58
3.4	配制方法及其设备	60
3.4.1	物料配制的一般方法	60
3.4.2	混合设备	60
3.4.3	混炼设备	63
3.4.4	粉碎或造粒	70
第4章	挤出成型	74
4.1	挤出成型概述	74
4.2	挤出装备及其原理	74
4.2.1	单螺杆挤出机	74
4.2.2	双螺杆挤出机	86
4.2.3	双螺杆挤出机的优势和使用范围	93
4.3	挤出工艺	95
4.3.1	挤出工艺流程	95
4.3.2	挤出工艺条件	96
4.4	典型制品的挤出	97
4.4.1	塑料管材的挤出成型	97
4.4.2	塑料薄膜的挤出成型	101
4.4.3	塑料板片材的挤出成型	110
4.4.4	电线电缆的挤出包覆成型	111
4.4.5	塑料单丝的挤出成型	114
4.5	挤出成型新技术简介	116
4.5.1	反应挤出	116
4.5.2	固态挤出	119
4.5.3	振动挤出	121
4.5.4	微纳层共挤出	122
第5章	注塑成型	125
5.1	注射机	125
5.1.1	注射机的分类	125
5.1.2	注射机的组成	128
5.1.3	注射机的工作过程	134
5.2	注射模具	135
5.2.1	模具的主要结构	135
5.2.2	热流道模具	136
5.3	注射成型原理	138
5.3.1	塑化过程	138

5.3.2	注射流动过程	141
5.3.3	冷却定型过程	144
5.4	注射成型工艺	144
5.4.1	注射模塑工艺流程	144
5.4.2	注射成型工艺条件	148
5.4.3	注射制品缺陷分析	151
5.5	注射成型新技术	154
5.5.1	气体辅助注射成型	154
5.5.2	可熔芯注射成型	158
5.5.3	共注射成型	160
5.5.4	反应注射成型	163
第6章	压延成型	167
6.1	压延成型系统的组成	167
6.1.1	压延机	168
6.1.2	压延辅机	170
6.2	物料在压延机辊筒间隙中的流动分析	171
6.2.1	物料在辊筒间隙中的压力分布	171
6.2.2	物料在钳住区的速度分布	173
6.2.3	辊筒的分离力	174
6.2.4	辊筒的驱动功率	175
6.3	压延成型工艺及其控制	176
6.3.1	压延工艺过程及条件	176
6.3.2	影响压延制品质量的因素	177
6.4	压延成型的进展	181
6.4.1	异径辊筒压延机	182
6.4.2	压延牵伸(拉伸扩幅)	182
6.4.3	压延机的大型、高速、精密、自动化	183
6.4.4	冷却装置的改进	184
6.5	复合膜和人造革的生产	184
6.5.1	复合膜	184
6.5.2	人造革	186
第7章	发泡成型	190
7.1	泡沫塑料的定义和特征	190
7.2	泡沫塑料的发泡原理	190
7.2.1	气泡核的形成	190
7.2.2	气泡的增长	191
7.2.3	气泡的稳定	191
7.3	泡沫塑料发泡方法	191
7.3.1	机械发泡法	191

7.3.2	物理发泡法	193
7.3.3	化学发泡法	197
7.4	泡成型新技术	200
7.4.1	超临界二氧化碳发泡	200
7.4.2	高压釜发泡	202
第8章	二次成型	204
8.1	高分子材料二次成型的条件	204
8.2	中空吹塑	205
8.2.1	中空吹塑的基本方法	205
8.2.2	中空吹塑设备与模具	208
8.2.3	中空吹塑成型工艺过程及条件控制	218
8.2.4	中空吹塑成型新技术	220
8.3	热成型	222
8.3.1	热成型的基本方法	223
8.3.2	热成型设备和模具	228
8.3.3	热成型工艺及工艺条件	230
第9章	热固性塑料的成型	235
9.1	压制成型	235
9.1.1	模压料的成型工艺特性	235
9.1.2	液压机	237
9.1.3	压制模具	238
9.1.4	模压成型过程与操作	240
9.1.5	模压成型工艺条件	244
9.2	传递模塑	247
9.2.1	传递模塑方法	247
9.2.2	传递模塑设备	250
9.2.3	传递模塑工艺控制	251
9.3	热固性塑料的注射模塑	255
9.3.1	热固性塑料注射模塑设备	256
9.3.2	热固性塑料注射成型工艺	256
9.4	热固性塑料的挤出成型	258
9.5	增强热固性塑料层压成型	259
9.5.1	浸渍上胶工艺	260
9.5.2	层压板材的压制成型	261
9.5.3	热处理和后加工	262
第10章	其他成型方法	263
10.1	铸塑成型	263
10.1.1	静态浇铸	263
10.1.2	嵌铸	264

10.1.3 离心浇铸	265
10.1.4 流延铸塑	267
10.1.5 搪塑和蘸塑成型	268
10.2 滚塑	271
10.3 冷压烧结成型	274
10.3.1 冷压制坯	275
10.3.2 烧结	275
10.3.3 冷却	276
10.4 3D 打印	277
10.4.1 3D 打印技术原理	278
10.4.2 3D 打印工艺过程	279
10.4.3 3D 打印材料	279
第 11 章 通用热塑性树脂及其加工	281
11.1 通用塑料的加工特性和方法	281
11.1.1 聚乙烯	281
11.1.2 聚丙烯	285
11.1.3 聚氯乙烯	289
11.1.4 聚苯乙烯	294
11.1.5 ABS 树脂	297
11.2 通用工程塑料的加工特性和方法	301
11.2.1 聚酰胺	301
11.2.2 聚碳酸酯	306
11.2.3 聚甲醛	309
11.2.4 热塑性聚酯	313
11.2.5 聚苯醚	319
第 12 章 高分子材料循环利用	323
12.1 高分子材料的生产、消费与废弃状况	323
12.2 废旧高分子材料的处理原则	325
12.2.1 减少来源	325
12.2.2 再使用	326
12.2.3 循环	326
12.2.4 回收	326
12.3 废旧高分子材料的分离	326
12.3.1 手工分离	326
12.3.2 密度法分离	327
12.3.3 静电分离	328
12.3.4 熔点(软化点)分离	329
12.3.5 选择溶解分离	329
12.3.6 光学分离	330

12.4 废旧高分子材料的破碎与减容	331
12.4.1 粉碎	332
12.4.2 固态剪切挤出	332
12.4.3 凝结与压实	333
12.4.4 脱泡减容	333
12.4.5 溶解法减小尺寸	333
12.5 高分子材料循环利用原理和技术	334
12.5.1 高分子材料循环利用中的一些基本概念	334
12.5.2 高分子材料循环利用技术	335
主要参考文献	339

第 1 章 绪 论

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。高分子材料具有原料来源丰富，制造方便，品种繁多，用途广泛，质轻价优等特点，现已形成一个庞大的工业体系，其应用遍及现代工业的各个领域和人民生活的衣食住行，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。因此，世界各国都毫不例外地把高分子材料作为重点学科来加以发展，高分子材料也被认为是 21 世纪最有发展前途的材料。

1.1 高分子材料及高分子工业

1.1.1 高分子材料的类型

具有聚合反应能力的单体通过加成、缩合或配位聚合反应机理，借助本体聚合、溶液聚合、乳液聚合、界面聚合等工业技术，最终转化成为具有特定结构和性能的高分子材料，这些高分子材料也被称为高分子材料。高分子材料有多种分类方法，具体如下文所示：

- 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、杂链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。

通常意义上的高分子材料是以聚合物（树脂）为基体，再配有其他添加剂（助剂）所构成的材料。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，所以，掌握高分子材料的分类方法很有必要。

1.1.2 高分子工业的组成和发展

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，生产具有特定的化学组成、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配料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。

高分子工业的发展大致经历了三个时期,即天然高分子的利用与加工,天然高分子的改性和合成,合成高分子的工业生产(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珞的技术,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。

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,主要研究高分子的结构与性能的关系,通过研究分子运动来揭示结构与性能之间内在联系以及它们的基本规律,从而对高分子的合成材料的成型加工、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,两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。20世纪50年代是高分子化学大发展时期,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,流变学研究的进一步开展,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被应用。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,大型聚合反应设备及新工艺的使用,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。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

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。高分子材料成型加工就是利用一切可以实施的技术和手段使聚合物原料成为具有一定外形又有使用价值的物件或定型材料的工艺过程。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，而是把它看成控制制品结构和性能的中心环节，加工成型已从一项实用技术变成一门应用科学。因此，从应用角度来讲，赋予高分子材料最终形状和使用方式的成型加工技术有着重要的意义。

1.2.1 高分子材料加工成型的过程和方法

高分子材料成型加工包含两方面的功用，一是赋予制品以外形（包括形状和尺寸），二是通过控制组分、配比以及加工工艺条件，对制品内部的结构和形态进行控制，以保证制品性能的需要。

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，高分子材料的成型加工过程包括四个阶段：1) 原材料的准备，如聚合物和添加物的预处理、配料、混合等；2) 使原材料产生变形或流动，并成为所需的形状；3) 材料或制品的固化；4) 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经由这些方法而生产。

(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、涂料和黏合剂等亦大多用溶液法加工。

(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) 聚合物分散体的加工：如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、胶粘剂等；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）、粘合、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，并对溶液和分散体的部分加工方法进行了简介。

1.2.2 高分子材料成型加工的发展概况

高分子材料最终是以制品的形式来实现其使用价值的，成型加工是聚合物从材料走向制品的必经环节。伴随着合成高分子材料一百多年的发展历史，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，没有现成的制品加工技术可供采用，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。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聚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，螺杆式注射机问世，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，反应注塑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世纪末以来，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，如熔芯注射、层状注射、振动挤出、固态挤出、微纳层挤出、3D打印等等，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。本教材用主要篇幅介绍了成熟的聚合物加工技术，也用少量的篇幅简要介绍了部分新技术。

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，聚合物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

高分子材料的抗拉强度一般为几十兆帕，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 $1/4 \sim 1/6$ ，所以其比强度并不比某些金属低。此外，聚合物的力学强度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，同一聚合物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。聚合物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

聚合物的力学性质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的不同。

所谓静态黏弹性是指聚合物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，聚合物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，它们又都反映聚合物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的分子运动和转变。

聚合物作为结构材料，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

由于聚合物材料的黏弹特性,在摩擦引起的剪切过程中需要消耗更多的能量,所以,聚合物具有较高的耐磨性。聚合物的摩擦因数各不相同,内耗大的聚合物摩擦因数亦较大。表 2-1 列出了常见聚合物的滑动摩擦因数。

表 2-1 常见聚合物的滑动摩擦因数

聚合物	摩擦因数 μ	聚合物	摩擦因数 μ
聚四氟乙烯	0.04 ~ 0.15	尼龙 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	丁苯橡胶	0.50 ~ 3.00
聚苯乙烯	0.33 ~ 0.50	顺丁橡胶	0.40 ~ 1.50
聚甲基丙烯酸甲酯	0.25 ~ 0.50	天然橡胶	0.50 ~ 3.00
聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.20 ~ 0.30		

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

聚合物材料的力学强度远低于金属材料,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。一般对同种聚合物而言,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。因此,同一聚合物可能因牌号的不同而导致力学性能产生较大差异。

2.1.1.2 高分子材料力学性能表征

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)不断地在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

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。国标 GB 1040.1—2006 (塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分 总则)、GB 1040.2—2006 (塑料 拉伸性能的测定 第 2 部分 模塑和挤塑塑料的试验条件)、GB 1040.3—2006 (塑

料 拉伸性能的测定 第3部分 薄膜和薄片的试验条件)、GB 1040.4—2006 (塑料 拉伸性能的测定 第4部分 各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件)、GB 1040.5—2006 (塑料 拉伸性能的测定 第5部分 单向纤维增强复合材料的试验条件)、GB 8804—1—2003 (热塑性塑料管材拉伸性能测定)、GB 8804—2—2003 (热塑性塑料管材拉伸性能测定) 及 GB 8804—3—2003 (热塑性塑料管材拉伸性能测定) 中规定了不同性状的高分子材料拉伸强度的测试方法。拉伸强度按式 (2-1) 计算:

$$\sigma = \frac{P}{b \cdot d} \times 10^{-6} \quad (2-1)$$

式中: σ ——拉伸强度, MPa

P ——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, 高聚物的应力-应变关系不呈线性关系, 只有当变形很小时, 高聚物才可视为虎克弹性体, 因此, 拉伸模量 (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。国标 GB 1043.1—2008 (塑料 简支梁冲击性能的测定) 和国标 GB 1843—2008 (塑料 悬臂梁冲击强度的测定) 分别规定了悬臂梁和简支梁的试验条件; 另外 GB 14152—2001 (热塑性塑料管材——耐外冲击性能的测试——时针旋转法) 还对管材的冲击性能测试方法做出了规定。

无缺口试样冲击强度按式 (2-4) 计算:

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

式中: α ——冲击强度, kJ/m²

A ——试样破断所消耗的能量, J

d ——试样厚度, m