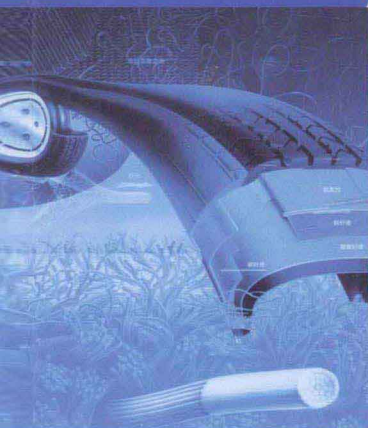




普通高等教育“十二五”规划教材



[高分子材料与工程专业系列教材]  
**高分子材料成型加工**  
(第三版)

**Polymer**  
Materials Processing

唐颂超 主编



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

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

# 高分子材料成型加工

## (第三版)

唐颂超 主编  
唐颂超 潘泳康 董擎之 编

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料成型加工/唐颂超主编;潘泳康,董擎之编. —3版. —北京:中国轻工业出版社,2013.5

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

ISBN 978-7-5019-9174-7

I. ①高… II. ①唐… ②潘… ③董… III. ①高分子材料-成型-工艺-高等学校-教材 IV. ①TQ316

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 035597 号

责任编辑:林媛  
版式设计:王超男

责任终审:滕炎福  
责任校对:燕杰

封面设计:锋尚设计  
责任监印:张可

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:2013年5月第3版第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:22.75

字数:562千字

书号:ISBN 978-7-5019-9174-7 定价:50.00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](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

100212J1X301ZBW

谨以此书

献给华东理工大学建校 60 周年  
(1952—2012)

# 高分子材料与工程专业系列教材 编审委员会名单

主 任：励杭泉

副主任(按汉语拼音为序)：

方少明 冯 钠 顾 凯 李齐方 李青山 卢秀萍 彭响方  
钱 欣 唐颂超 肖小亭 徐伟箭 杨 彪 姚金水 余 强

委 员(按汉语拼音为序)：

崔永岩 方少明 冯 钠 励杭泉 刘 斌 卢秀萍 彭响方  
钱 欣 唐颂超 邬素华 项爱民 姚金水 余 强 曾 威  
张桂霞

## 出版说明

本系列教材是根据国家教育改革的精神,结合“十一五”期间院校教育教学改革的实践和“十二五”期间院校高分子材料与工程专业建设规划,根据院校课程设置的需求,编写的高分子材料与工程专业系列教材,旨在培养具备材料科学与工程基础知识和高分子材料与工程专业知识,能在高分子材料的合成、改性、加工成型和应用等领域从事科学研究、技术和产品开发、工艺和设备设计、材料选用、生产及经营管理等方面工作的工程技术型人才。本系列教材架构清晰、特色鲜明、开拓创新,能够体现广大工程技术型高校高分子材料工程教育的特点和特色。

为了适应高分子材料与工程专业“十二五”期间本科教育发展的需求,中国轻工业出版社组织相关高分子材料与工程专业院校召开了“‘高分子材料与工程’专业‘十二五’规划教材建设研讨会”,确定了“高分子材料与工程”专业的专业课教材,首批推出的是:《高分子物理》《高分子科学基础实验》《高分子材料加工工程专业实验》《高分子材料科学与工程导论》(双语)、《高分子材料成型加工》(第三版)、《高分子材料成型工程》《聚合物制备工程》《聚合流变学基础》《聚合物成型机械》《塑料模具设计》《高分子化学与物理》《塑料成型 CAE 技术》《塑料助剂及配方》《涂料与黏合剂》《材料导论》。

本系列教材具有以下几个特点:

1. 以培养高分子材料与工程专业高级工程技术型人才为目标,在经典教学内容的基础上,突出实用性,理论联系实际,适应本科教学的需求。
2. 充分反映产业发展的情况,包括新材料、新技术、新设备和新工艺,把基本知识的教学和实践相结合,能够满足工程技术型人才培养教学目标。
3. 教材的编写更注重实例的讲解,而不只是理论的推导,选用的案例也尽量体现当前企业技术要求,以便于培养学生解决实际问题的能力。
4. 为了适应现代多媒体教学的需要,主要教材都配有相关课件或多媒体教学资料,助学助教,实现了教学资源的立体化。

本系列教材是由多年从事教学的一线教师和具有丰富实践经验的工程技术人员共同编写的,首批推出的十五本教材是在充分研究分析“十二五”期间我国经济社会发展和材料领域发展战略的基础上,结合院校教学特色和实践经验编写而成的,基本能够适应我国目前社会经济的迅速发展和需要,也能够适应高分子材料与工程专业人才的培养。同时,由于教材编写是一项复杂的系统工程,难度较大,也希望行业内专家学者不吝赐教,以便再版修订。

## 第三版前言

本书为高等学校高分子材料与工程专业及相关专业本科生使用的教材。2000年5月《高分子材料成型加工》第一版出版后受到了多方面的关注和欢迎，2005年对该书进行了修订，该书在国内被广泛采用，第二版出版至今7年中已印刷10次，深受广大师生和高分子材料领域中的同行的好评。2007年该书获得上海市优秀教材一等奖。

第二版教材出版至今，编者一直担任本课程的主讲，在教学实践过程中，发现教材中的一些问题，听取了全国相关学校教师和学生等各方面的意见和建议，感到需要对教材进行修编。

在编写过程中，根据教育部高分子材料与工程专业教学指导委员会制定的《高分子材料与工程专业指导性规范》对本课程知识体系和知识点的要求，秉承了前两版的编写初衷，保持其综合性、系统性、科学性。在体现“高分子材料-成型加工-材料制品性能”这条高分子材料成型加工的主线的基础上，对基本知识、基本理论、基本概念的陈述部分进行精简，体现叙述简洁。在部分章节上对内容的编排进行了较大的调整，删除了部分章节，更加体现精简、实用。同时，增加了部分高分子材料及制品生产的实例及案例分析，以培养学生的工程能力和分析问题的能力。

第三版由华东理工大学唐颂超主编；第1、2、4、6、7、8、9、10、11、12章由唐颂超编写；第3章由华东理工大学潘泳康编写，唐颂超修改；第5章由潘泳康编写；华东理工大学董擎之编写了第8章及第12章中纤维纺丝加工的部分内容；全书由唐颂超统稿、定稿。

本书前两版的部分编写者由于各种原因不再参与第三版的工作，对他们在以往工作中所做出的贡献和成绩，编者谨表示深切的感谢。在编写过程中，我的几位研究生参与了图表的编绘工作，还得到了华东理工大学教材建设立项的支持，在此一并表示感谢。

限于编者水平，疏漏不当之处，敬请同行和广大读者批评指正。

唐颂超

2012年10月于上海

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 高分子材料及成型加工	1
1.1.1 高分子材料	1
1.1.2 高分子材料成型加工	2
1.2 高分子材料工程特征	3
1.2.1 高分子材料特征	3
1.2.2 高分子材料的工程特征	4
1.2.3 高分子材料及制品性能	4
1.3 高分子材料制造及成型加工程序	4
1.3.1 高分子材料的制造	4
1.3.2 成型加工	6
1.3.3 高聚物特性与成型加工的关系	7
1.4 高分子材料的发展历史与未来	9
习题与思考题	10
第2章 高分子材料学	11
2.1 高分子化合物	11
2.1.1 聚合物种类	11
2.1.2 聚合物制造方法的影响	14
2.2 影响高分子材料性能的化学因素	23
2.2.1 聚合物分子构成	23
2.2.2 键接结构与构型	25
2.2.3 共聚物的组成与序列分布	26
2.2.4 基团与端基	27
2.2.5 支化与交联	28
2.3 影响高分子材料性能的物理因素	30
2.3.1 相对分子质量及其分布	30
2.3.2 结晶性	33
2.3.3 成型过程中的取向	39
2.3.4 熔体黏度与成型性	41
2.4 聚合物改性对高分子材料性能的影响	44
2.4.1 聚合物化学改性	44
2.4.2 聚合物共混改性(合金化)	48
2.4.3 聚合物填充改性	51
2.5 高分子材料的环境问题	52



2.5.1	高分子材料生产过程中的环境问题	53
2.5.2	高分子材料使用过程中的环境问题	54
2.5.3	对高分子材料环境问题的对策	55
	习题与思考题	59
<b>第3章</b>	<b>添加剂</b>	<b>60</b>
3.1	稳定剂	60
3.1.1	热稳定剂	61
3.1.2	抗氧化剂(防老剂)	63
3.1.3	光稳定剂	66
3.2	增塑剂	69
3.2.1	增塑作用及增塑剂分类	69
3.2.2	增塑剂的主要品种	70
3.2.3	增塑剂的选用	71
3.3	润滑剂	73
3.3.1	润滑剂的作用与分类	74
3.3.2	润滑剂的主要品种	74
3.3.3	润滑剂的选用	75
3.4	交联剂及相关添加剂	75
3.4.1	常用的交联剂	75
3.4.2	交联用其他添加剂	76
3.4.3	交联机理	77
3.4.4	交联剂及相关添加剂的选用	80
3.5	填充剂	80
3.5.1	填充剂的作用与分类	81
3.5.2	填充剂的补强机理	81
3.5.3	影响补强效果的因素	81
3.5.4	常用的填充剂	82
3.5.5	填充剂的选用	83
3.6	其他添加剂	83
3.6.1	着色剂	83
3.6.2	发泡剂	84
3.6.3	阻燃剂	84
3.6.4	抗静电剂	84
3.6.5	偶联剂	84
3.6.6	防霉剂	85
	习题与思考题	85
<b>第4章</b>	<b>高分子材料制品设计和配方设计</b>	<b>86</b>
4.1	高分子材料制品设计	86
4.1.1	制品设计原则	86

4.1.2 制品设计步骤 .....	87
4.2 高分子材料配方设计 .....	89
4.2.1 配方设计原则 .....	90
4.2.2 配方的表示方法 .....	91
4.2.3 配方设计步骤 .....	92
4.2.4 配方设计实验方法 .....	93
4.2.5 高分子材料配方实例 .....	94
习题与思考题 .....	99
<b>第5章 聚物流变学基础</b> .....	<b>100</b>
5.1 聚合物熔体的流动 .....	100
5.1.1 流动类型 .....	100
5.1.2 非牛顿型流动 .....	101
5.2 聚物流体的奇异流变现象 .....	104
5.2.1 高黏度与剪切变稀行为 .....	104
5.2.2 Weissenberg 效应 .....	105
5.2.3 Barus 效应 .....	105
5.2.4 不稳定流动与熔体破裂 .....	105
5.2.5 无管虹吸与无管侧吸 .....	105
5.2.6 次级流动 .....	106
5.2.7 触变性和震凝性 .....	106
5.2.8 湍流减阻与渗流增阻 .....	107
5.3 聚合物熔体剪切黏度的影响因素 .....	107
5.3.1 剪切速率的影响 .....	107
5.3.2 温度的影响 .....	108
5.3.3 压力的影响 .....	109
5.3.4 分子结构的影响 .....	109
5.3.5 添加剂的影响 .....	111
5.4 聚物流变性能测定 .....	111
5.4.1 毛细管流变仪 .....	111
5.4.2 旋转流变仪 .....	114
5.4.3 转矩流变仪 .....	115
5.5 聚合物熔体的压力流动 .....	116
5.5.1 聚合物熔体在圆管通道中的流动 .....	117
5.5.2 聚合物熔体在狭缝通道中的流动 .....	118
习题与思考题 .....	119
<b>第6章 高分子材料混合与制备</b> .....	<b>120</b>
6.1 混合与分散 .....	120
6.1.1 混合机理 .....	120
6.1.2 混合的类型 .....	123

6.1.3	混合状态的判定	126
6.2	混合设备	128
6.2.1	混合设备的分类	128
6.2.2	间歇混合设备	128
6.2.3	连续混合设备	131
6.3	橡胶的塑炼与混炼	134
6.3.1	生胶的塑炼	134
6.3.2	胶料的混炼	138
6.4	塑料的混合与塑化	142
6.4.1	原料的准备	142
6.4.2	混合	143
6.4.3	塑化	143
6.4.4	粉碎和粒化	144
6.5	聚合物溶液、分散体和胶乳的配制	145
6.5.1	塑料溶液的配制	145
6.5.2	溶胶塑料的配制	147
6.5.3	胶乳的配制	148
6.6	聚合物共混	149
6.6.1	聚合物共混目的及作用	149
6.6.2	共混物的形态结构	150
6.6.3	共混物制备方法及相关设备	152
	习题与思考题	153
<b>第7章</b>	<b>压制成型</b>	<b>155</b>
7.1	热固性塑料的模压成型	155
7.1.1	热固性模塑料的成型工艺性能	155
7.1.2	模压成型的设备和模具	157
7.1.3	模压成型工艺	159
7.1.4	模压成型工艺条件及控制	161
7.2	橡胶制品的模型硫化	164
7.2.1	橡胶制品及生产工艺	164
7.2.2	橡胶制品的硫化	165
7.2.3	模型硫化工艺及硫化条件	169
7.3	复合材料压制成型	171
7.3.1	层压成型	172
7.3.2	模压成型	174
7.3.3	手糊成型	177
	习题与思考题	180
<b>第8章</b>	<b>挤出成型</b>	<b>181</b>
8.1	挤出成型设备	181

8.1.1	挤出机	181
8.1.2	单螺杆挤出机基本结构及作用	182
8.1.3	机头和口模	187
8.2	挤出成型原理	188
8.2.1	挤出过程和螺杆各段的职能	188
8.2.2	挤出理论	189
8.2.3	挤出机的生产率	195
8.2.4	螺杆和机头(口模)的特性曲线	197
8.2.5	影响挤出机生产率的因素	197
8.3	挤出成型工艺	199
8.3.1	挤出工艺流程	199
8.3.2	典型挤出制品成型工艺	202
8.4	橡胶的压出	209
8.4.1	压出机	209
8.4.2	压出工艺	210
8.4.3	压出成型的影响因素	211
8.5	合成纤维的挤出熔融纺丝	212
8.5.1	合成纤维的纺丝	212
8.5.2	涤纶纤维的螺杆挤出纺丝	214
8.5.3	合成纤维的高速纺丝	217
8.6	热固性塑料挤出	218
8.6.1	热固性塑料挤出成型的基本原理	219
8.6.2	与热塑性塑料挤出比较	219
8.7	双螺杆挤出及反应挤出	220
8.7.1	双螺杆挤出机结构种类及工作原理	220
8.7.2	双螺杆挤出机和单螺杆挤出机比较	223
8.7.3	双螺杆挤出机的应用	223
8.7.4	反应性挤出	224
	习题与思考题	228
<b>第9章</b>	<b>注射成型</b>	<b>229</b>
9.1	注射机的结构与作用	229
9.1.1	注射机分类	229
9.1.2	注射机的基本结构	232
9.1.3	注射机的工作过程	235
9.2	注射过程原理	236
9.2.1	注射成型过程	236
9.2.2	塑化过程	237
9.2.3	注射充模过程	241
9.2.4	增密与保压过程	244

9.2.5	倒流与冷却定型过程	245
9.3	注射成型工艺及工艺条件	247
9.3.1	注射成型工艺流程	247
9.3.2	注射成型工艺条件的选择	248
9.3.3	常见注射制品缺陷及解决方案	252
9.4	橡胶注射成型	254
9.4.1	注射成型设备	254
9.4.2	注射过程及原理	255
9.4.3	注射工艺条件	256
9.5	热固性塑料注射成型	259
9.5.1	热固性塑料注射成型原理	259
9.5.2	注射原料的要求	260
9.5.3	热固性塑料注射机的结构特征	260
9.5.4	注射工艺及成型条件	261
9.6	反应注射成型	262
9.6.1	反应注射成型工艺特点	262
9.6.2	RIM 成型设备	263
9.6.3	反应注射成型工艺流程和控制	265
	习题与思考题	266
<b>第 10 章</b>	<b>压延成型</b>	<b>268</b>
10.1	压延设备	268
10.1.1	压延机的分类	268
10.1.2	压延机的基本结构	269
10.2	压延成型原理	271
10.2.1	物料在压延辊筒间隙的压力分布	271
10.2.2	物料在压延过程中压缩和延伸变形	273
10.2.3	物料在压延辊筒间隙的流速分布	274
10.3	压延成型工艺	276
10.3.1	供料阶段	277
10.3.2	压延阶段	277
10.3.3	压延操作条件	278
10.4	影响压延制品质量的因素	279
10.4.1	压延效应	279
10.4.2	影响制品表面质量的因素	280
10.4.3	影响制品厚度的因素	281
10.5	橡胶的压延	281
10.5.1	压延设备	282
10.5.2	压延前的准备工艺	282
10.5.3	压延工艺	283

习题与思考题	285
<b>第 11 章 二次成型</b>	<b>286</b>
11.1 二次成型原理	286
11.1.1 聚合物的物理状态	286
11.1.2 聚合物的黏弹性形变	287
11.1.3 成型条件的影响	288
11.2 中空吹塑成型	289
11.2.1 注射吹塑	289
11.2.2 挤出吹塑	290
11.2.3 中空吹塑工艺过程的控制	291
11.3 拉幅薄膜成型	293
11.3.1 平挤逐次双向拉伸薄膜的成型	293
11.3.2 管膜双向拉伸薄膜的成型	295
11.4 热成型	295
11.4.1 热成型的基本方法	296
11.4.2 热成型工艺及工艺影响因素	300
11.5 合成纤维的拉伸	302
11.5.1 拉伸的目的和作用	302
11.5.2 拉伸的方式	303
11.5.3 合成纤维的后加工	304
习题与思考题	306
<b>第 12 章 其他成型工艺</b>	<b>307</b>
12.1 铸塑成型	307
12.1.1 静态浇铸	307
12.1.2 嵌铸	308
12.1.3 离心浇铸	308
12.1.4 流延铸塑	309
12.1.5 搪塑	310
12.1.6 滚塑	311
12.2 泡沫材料成型	312
12.2.1 泡沫材料成型原理	312
12.2.2 泡沫材料成型方法	314
12.3 冷压烧结成型	315
12.3.1 冷压制坯	315
12.3.2 烧结	316
12.3.3 冷却	317
12.4 胶乳制品的加工	317
12.4.1 胶乳工艺基本原理	317
12.4.2 胶乳制品的制造工艺	318

12.5 合成纤维的溶液纺丝 .....	320
12.5.1 腈纶短纤维的生产工艺 .....	320
12.5.2 腈纶长纤维的生产工艺 .....	323
12.5.3 合成纤维的冻胶纺丝法 .....	324
12.5.4 合成纤维的干-湿法纺丝 .....	326
12.6 静电纺丝 .....	328
12.6.1 静电纺丝成型分析 .....	329
12.6.2 纤维的收集 .....	330
习题与思考题 .....	333
附录 本书中英文代号的含义 .....	334
参考文献 .....	340

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 高分子材料及成型加工

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是工业革命的先导。进入 21 世纪，新材料、生物技术和信息技术被认为是构成现代文明的三大支柱，而新材料又是高新技术发展的重要基础平台。

材料是具有一定性能，可用于制作有用物品的物质。材料的成分/结构、制备/合成/加工、性质和使用效能是材料科学与工程四个基本要素。这四个要素是相互关联、相互制约的，如图 1-1 所示。根据材料的组成结构，可分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料；根据材料的性能特征，又可分为以力学性能为其应用基础的结构材料和以物理及化学性能为其应用基础的功能材料两大类。

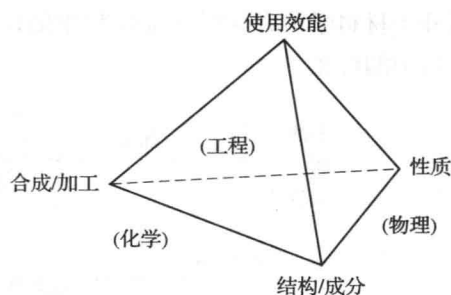


图 1-1 材料四要素的关系

不管是何种材料，在材料的制备（加工）方法上、在材料的结构与性能关系的研究上、在材料的使用上，都具有通性，是可以相互借鉴、相互渗透、相互补充的。即各种材料，都具备如下特点：

- ① 一定的组成；② 可加工性；③ 形状保持性；④ 使用性能；⑤ 经济性；⑥ 再生性。

### 1.1.1 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组分的材料。高分子化合物系指分子量很高的物质，有时简称高分子、大分子或聚合物。高分子（Macromolecule, Polymer）是指以化学键相连接的大量有机小分子的聚集体，常用高分子的相对分子质量高达  $10^4 \sim 10^6$ ，而一般有机化合物相对分子质量都在 500 以内，少数高于 500，但也在 1000 以下。因此，相对分子质量高是高分子化合物的基本特征，也正是由于其相对分子质量高，它才具有许多与低分子化合物截然不同的性质和性能。通常所说的高分子材料是从应用的角度对高分子进行归类，如分类为塑料、橡胶、纤维、涂料、黏合剂、功能高分子、聚合物基复合材料等。而所谓的三大合成材料则是指合成塑料、合成橡胶、合成纤维。

高分子材料学科的内涵是，以材料的共性为基础，研究高分子材料的基本特性，研究高分子材料制备、加工、应用中的科学问题和工程问题，及与其他材料的复合问题。因此，当今高分子科学与工程学科呈现出在化学和材料科学与工程两个学科中并肩发展的新局面，显示出朝气蓬勃的青春活力。

高分子材料一般具有以下五个条件：

- (1) 高分子材料是以聚合物为主体，即高分子材料的性质主要由聚合物来决定。
- (2) 高分子材料属多相复合体系，即是由两种或两种以上组分组成，形成宏观均相、



微观或亚微观分相的形态结构。

(3) 高分子材料必须具有可加工性。

(4) 具有良好的使用性能和适当的使用寿命。

(5) 具有工业化生产规模, 自从 1869 年第一个人工半合成的高分子材料——赛璐珞问世以来, 100 多年来, 高分子材料已发展到成百上千个品种, 但最常用的、具有工业化生产规模的品种仅数十种, 却占到总产量的 95% 以上。

### 1.1.2 高分子材料成型加工

高分子材料及其制品的最初原料来自于天然的石油、煤、天然气等, 经过一系列的原料加工、化学合成和聚合反应得到聚合物, 再通过成型加工制得高分子材料制品。图 1-2 为高分子材料学科在化学工业学科中的位置以及高分子材料成型加工在高分子材料科学与工程体系中的位置。

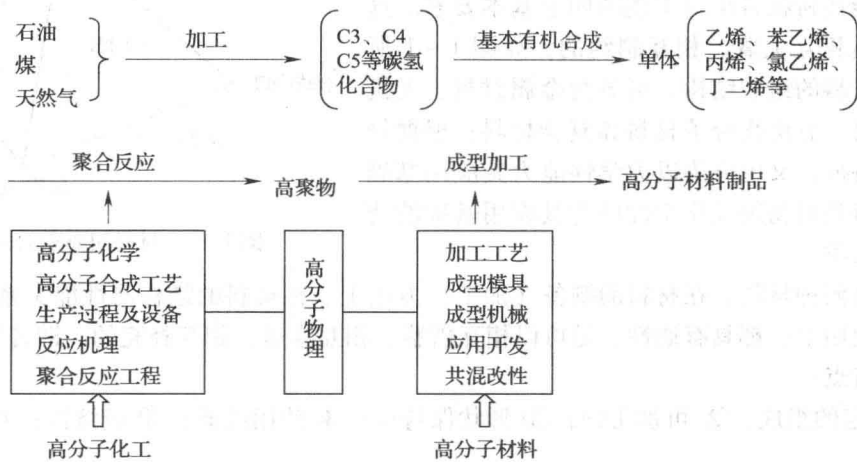


图 1-2 高分子材料科学与工程体系 (Polymer Material Science & Engineering)

高分子材料成型加工定义为：高分子材料（由高分子化合物和添加剂组成）是通过成型加工工艺得到具有实用性的材料或制品过程的工程技术。研究内容包括：高分子材料如何通过成型加工制成具有一定性能的制品；材料的不同品种与成型加工方法的关系；同样的材料用不同的加工工艺方法或加工工艺条件，所得制品的性能为何不同；制品的性能与材料本身的性质有何关系，等等。

传统的、狭义的高分子材料成型加工工艺过程，如挤出成型、注射成型、压缩模塑、吹塑成型，以及混合和分散等过程被当作聚合物加工的“单元操作”。而广义的成型加工工艺组成中，在考虑加工操作的范畴时，熔融、成型、固化以及加工阶段的化学变化、物理变化都是加工工艺的组成要素。因此，高分子材料成型加工进一步定义为，要求通过共混、反应及分子组装等聚合物加工方法获得新的性能及功能，要求利用外场、温度、时间等组合控制材料非平衡态结构以获得特殊性能及功能。

因此，高分子材料成型加工并不是简单的工艺操作过程或由各个“单元操作”所组成，而是聚合物材料的外形控制与内部结构演变（结构化）的过程。其与传质、混合、力学、流变学、高分子化学、高分子物理等工程原理和科学基础密切相关。见图 1-3。