

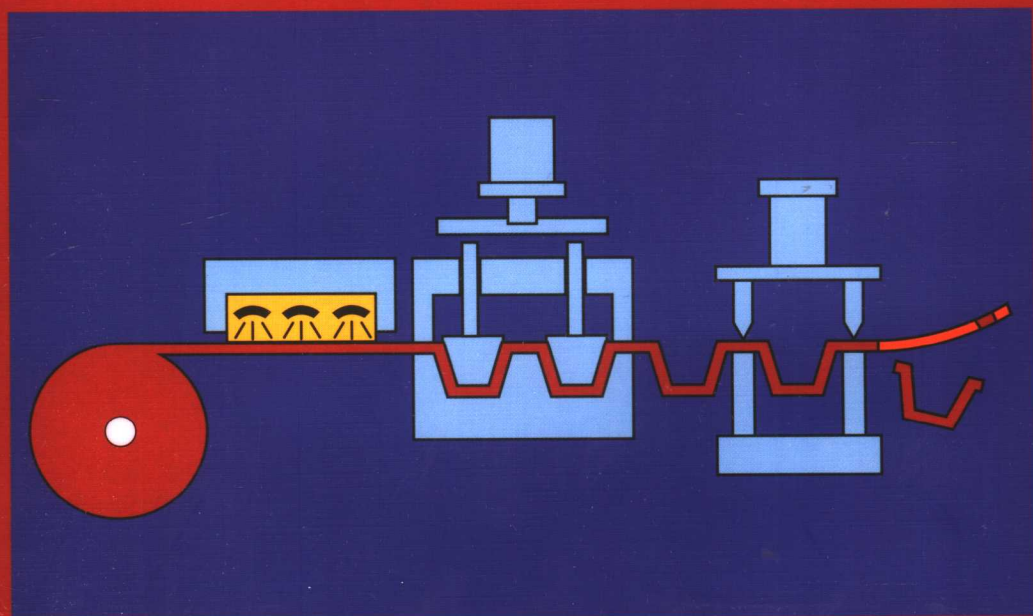
[德] A. 伊利希 (Adolf Illig) 主编

张丽叶 彭响方 等译

热成型实用指南

Thermoforming

A Practical Guide



化学工业出版社

ISBN 978-7-5025-9277-6



9 787502 592776 >

定价：25.00元

销售分类建议：高分子/塑料

热成型实用指南

[德] A. 伊利希 (Adolf Illig) 主编

[德] P. 施瓦茨曼 (Peter Schwarzmann) 著

张丽叶 彭响方 等译



化学工业出版社

· 北 京 ·

本译著不仅全面系统介绍了用于热成型的热塑性塑料的种类与性能,热成型的基本原理,各种热成型的工艺、操作条件,模具结构,成型过程中易出现的问题及故障的排除等,而且还详细介绍了作为热成型所用板、片、膜材的加工工艺及有关参数,热成型的辅助工序的结构与操作,制品的后处理,特别是其中还包括一些新型的热成型工艺。适合聚合物加工专业师生和从事本领域工作的工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

热成型实用指南/[德]伊利希(Illig, A.)主编,施瓦茨曼(Schwarzmann, P.)著;张丽叶,彭响方等译.

北京:化学工业出版社,2007.4

书名原文:Thermoforming: A Practical Guide

ISBN 978-7-5025-9277-6

I. 热… II. ①伊…②施…③张…④彭… III. 热成型-指南 IV. TQ320.66-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第036478号

Thermoforming: A Practical Guide/by Peter Schwarzmann, edited by Adolf Illig

ISBN 1-56990-275-5

Copyright © 2000 by Carl Hanser Verlag. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Carl Hanser Verlag.

本书中文简体字版由 Carl Hanser Verlag 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2003-3168

责任编辑:白艳云

装帧设计:潘峰

责任校对:洪雅姝

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张12½ 字数230千字 2007年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519680) 售后服务:010-64519661

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

译者前言

《热成型实用指南》是由德国 ADOLF ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. 公司的 P. 施瓦茨曼 (Peter Schwarzmann) 撰写的。

本专著不仅全面系统介绍了用于热成型的热塑性塑料的种类与性能, 热成型的基本原理, 各种热成型的工艺、操作条件, 模具结构, 成型过程中易出现的问题及故障的排除等, 而且还详细介绍了作为热成型所用板、片、膜材的加工工艺及有关参数, 热成型的辅助工序的结构与操作, 制品的后处理, 特别是其中还包括一些新型的热成型工艺, 这对于从事聚合物加工专业学习的学生来说, 可学到许多入门知识, 而且对于国内从事本领域工作的工程技术人员详细了解热成型的先进技术及解决生产中的实际问题, 是非常有益的。

总之, 该专著从原材料的选用、热成型基材的制备、制品设计、模具设计、成型工艺选择、成型过程操作等进行了详细的论述, 是一部内容详尽、系统、理论与实践结合, 反映当今热成型最新技术的读物, 适合于高等院校师生及工程技术人员参考。

本书分为 10 章, 由张丽叶、彭响方完成主要的翻译工作, 李允弘、陈己明、熊茂林、赖鹏、李建华、兰庆贵、王瑞红、林怡全、汪永斌、马可腾做了大量的工作。全书由张丽叶统稿。

限于译者水平, 对译文不妥之处, 敬请读者批评指正。

2007 年 2 月

前 言

几十年前认为不可能的热成型加工工艺，现在已在工程上大量应用。

除了传统的陈列品、冰箱、汽车部件由片材真空成型以外，包装的压力成型方法也占有很大的市场份额。不断改进的热塑性塑料，加上先进的机械设备，不仅增加了产量，也提高了模塑的质量与精度。

原来的热成型多为手工操作，但要成为制造工艺，要有相关材料的科学数据以及测量和反馈控制技术。工艺参数的重现性使热成型工艺可用于先进工业。除了 ILLIG 公司在商业杂志上发表过大量的文章外，ADOLF ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. 公司的训练课上，热成型基本原理也讲授了几十年。但到目前为止，一直缺乏一本综合介绍其原理和工艺的书，这本书可作为学生专题学习的入门，也是对高级工程师、技术人员大量具体问题的深度解答。

撰写《热成型实用指南》，满足了这方面的需要。

本书详细介绍了热成型的热塑性塑料、全部加工工艺、比较重要的机械和模具，还以实例详解了成型和模具制造的原理。

本书成书与 ILLIG 公司的 50 年历史密切相关，结合了公司大量的创意和经验。本人在此对作者 Peter Schwarzmann 的讲解，特致谢意。

感谢长期工作在 ILLIG 公司的研发中心主任 Günther Kiefer 及 Günther Harsch 教授对原稿严格校对，并提出大量的改进与加强的意见。

感谢 E. J. Tremmel 专家将此书翻译成英文。

作者希望《热成型实用指南》既易于新手入门，又有助于老手解决问题。

A. 伊利希

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 热塑性塑料	4
2.1 热塑性塑料的化学组成和结构	4
2.2 热塑性塑料的性能及其对热成型加工的影响	7
2.2.1 吸湿性	7
2.2.2 热成型中材料的摩擦行为	8
2.2.3 热成型塑料的收缩	9
2.2.4 取向	11
2.2.5 热塑性成型材料的静电荷	12
2.2.6 热成型塑料加热时的行为	12
2.2.7 热塑性塑料的牵伸	15
2.2.8 制品细节的清晰度	16
2.2.9 热成型塑料冷却过程行为	17
2.3 热塑性热成型材料的制造工艺	19
2.3.1 挤出片材	20
2.3.2 由吹膜机头生产薄膜(吹膜)	21
2.3.3 压延膜的生产	21
2.3.4 热塑性浇铸材料和片材	21
2.3.5 热成型材料生产的特殊工艺	22
2.3.6 热塑性热成型材料的处理工艺	22
2.4 热成型用热塑性塑料	22
2.4.1 聚苯乙烯(PS, 普通 PS)	27
2.4.2 高抗冲聚苯乙烯(SB, HIPS)	27
2.4.3 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)	28
2.4.4 取向聚苯乙烯(OPS)	28
2.4.5 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)	29
2.4.6 丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物(ASA)	30
2.4.7 苯乙烯-丙烯腈共聚物(SAN)	31
2.4.8 硬质聚氯乙烯(PVC-U)	31
2.4.9 高密度聚乙烯(HDPE)	32

2.4.10	聚丙烯 (PP)	33
2.4.11	聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	33
2.4.12	聚甲醛 (POM)	34
2.4.13	聚碳酸酯 (PC)	35
2.4.14	聚酯碳酸酯 (PEC)	35
2.4.15	聚苯醚 (PPE 或 PPO)	36
2.4.16	聚酰胺 (PA)	36
2.4.17	无定形聚酯 (APET)	37
2.4.18	非晶型聚酯 (PETG)	38
2.4.19	结晶聚酯 (CPET)	38
2.4.20	聚砜 (PSU)	39
2.4.21	聚醚砜 (PES)	39
2.4.22	丙烯腈/甲基丙烯酸/丁二烯 (A/MA/B)	40
2.4.23	醋酸纤维素衍生物 (CA 和 CAB)	40
2.4.24	乙二酸纤维素 (CdA)	41
2.4.25	聚偏氟乙烯 (PVDF)	41
2.4.26	聚醚酰亚胺 (PEI)	42
第 3 章	热成型基本原理和术语	43
3.1	成型装置	43
3.2	阳模和阴模成型	44
3.3	有效成型压力	45
3.4	成型面积、切入面积、夹持边缘	46
3.5	排气面、排气孔、排气槽、槽口	47
3.6	向下支持器和向上支持器	47
3.7	脱模斜度	48
3.8	凹槽制品和活络块	48
3.9	预吹塑 (气胀)、预抽气 (回吸)、抽空、压力平衡、通气	49
3.10	痕迹、冷却痕迹、条纹、皱褶	49
3.11	热成型模具和模件	50
3.12	成型比和牵伸比	50
3.13	壁厚计算、热成型制件	51
3.14	热成型制件的收缩和变形	52
第 4 章	热成型工艺	53
4.1	阳模成型	53
4.1.1	带机械预拉伸的阳模成型	53

4.1.2	阳模气胀成型	53
4.1.3	带有气胀和弯式气嘴的阳模成型	54
4.1.4	气胀对板和限高气胀阳模成型	56
4.1.5	钟罩内气胀或真空抽吸的阳模成型	56
4.1.6	气箱内的抽吸阳模成型	57
4.2	阴模成型	57
4.2.1	无预拉伸的阴模成型	57
4.2.2	机械预拉伸辅助阴模成型	59
4.2.3	带气胀和反向柱塞预成型的阴模成型	59
4.2.4	阴模成型的特殊工艺	60
4.3	阳模-阴模复合成型	61
4.3.1	气胀和反向柱塞的阳模-阴模成型	61
4.3.2	不同拉伸比制品几何形状的阳模-阴模成型	62
4.4	层合和加衬	63
4.4.1	用气密性材料进行层合	63
4.4.2	与透气材料的层合	65
4.4.3	原位发泡 EPS 容器的加衬	65
4.5	对模热成型	66
4.6	透明塑件的热成型	66
4.6.1	局部需要强拉伸的形状复杂的透明塑件的型坯的热成型	66
4.6.2	自由真空或自由气胀的热成型	66
4.6.3	带自由气胀的机械成型	67
4.6.4	用骨架模具的热成型	67
4.6.5	在低成型温度下的热成型	68
4.6.6	含有透明展示板制品的热成型	69
4.7	热成型中的特殊工艺	70
4.7.1	双片材成型	70
4.7.2	双型腔法(反外形成型)	72
4.7.3	用橡胶垫透气性材料进行的热成型	72
4.7.4	双壁片材的热成型	74
4.7.5	一个放置于另一个之上的双片材热成型	74
4.7.6	压缩成型—薄膜铰链、日期戳、接缝	74
4.7.7	镶件的嵌入	75
4.7.8	用在正反模机械成长纤增强热塑性塑料的热成型	75
4.7.9	长纤增强热塑性塑料的热成型——用机械拉伸法和用压缩空气进行预成型	76

4.8 成型和冲压结合的热成型	76
4.8.1 带有剪切的成型-冲压模	76
4.8.2 无边缘制件的成型-冲压模	80
4.8.3 凹底杯的热成型	81
4.8.4 有截坯切割配置的成型-冲压模	81
4.8.5 配有锯齿刀的成型-冲压模	82
4.9 用辊送料机进行热成型的特殊工艺	84
4.9.1 杯、碗、碟的加衬	84
4.9.2 成型模具中的标记(模内标记, IML)	85
4.10 预印材料的热成型	86
第5章 热塑性材料的加热	91
5.1 单片热成型机上片材的加热	91
5.2 自动卷送料热成型机上的加热成型材料	91
5.3 加热方法	92
5.3.1 辐射加热元件	92
5.3.2 接触式加热器	100
5.3.3 对流加热	104
5.4 用于片材生产线上的辐射加热器	104
5.4.1 由辐射陶瓷加热器加热	104
5.4.2 通过辐射合成氧化硅加热器加热	107
5.4.3 由辐射卤加热器加热	108
5.5 用在自动卷送料 TF 机上的辐射加热器	108
5.5.1 由辐射陶瓷加热器加热	108
5.5.2 由辐射合成氧化硅加热器加热	110
5.5.3 卷送料热成型机上的温度反馈控制	110
5.6 成型物料上的表面温度测量	110
第6章 热成型模具的热平衡	112
6.1 热成型模具生产前的热平衡要求	112
6.2 生产过程中热平衡装置的能量要求	113
6.3 直接热平衡模具的布局	114
6.4 间接热平衡模具的布局	116
6.5 电加热的布局	116
6.6 计算热平衡能力的实例	116
6.6.1 片材机上的热成型模具(165kg)	116
6.6.2 片材机上的热成型模具(400kg)	118

6.6.3 自动卷送料 TF 机上的成型-冲压模	119
第 7 章 脱模	121
7.1 脱模温度	121
7.2 设计易于脱模的模具	121
7.3 压力补偿和脱模气体	122
7.4 脱模速度	123
7.5 辅助脱模机构	123
7.6 塑件与热成型模具间的摩擦	125
7.7 凹槽脱模	125
第 8 章 热成型制品的修饰	129
8.1 单面切断切割制品	129
8.2 多维切割	134
8.3 清除毛刺	136
8.4 连接	137
8.4.1 黏结法	137
8.4.2 热塑性塑料的焊接	137
8.4.3 热封合	137
8.4.4 通过螺钉或铆钉连接	139
8.5 增强	139
8.6 表面处理的方法	139
第 9 章 热成型可能产生的缺陷	141
9.1 制品设计中易错之处	141
9.2 成型材料所要考虑的关键点	145
9.3 选择最合适的热成型设备	146
9.4 设备装配、安装过程可能出现的问题	147
9.5 与热成型模具相关可能出现的问题	147
9.6 使用新的热成型设备时可能出现的问题和故障	148
9.7 试验样品时的注意事项	149
9.8 红外线辐射加热装置防止缺陷产生	149
9.9 不当的成型压力	150
9.10 皱褶的防止	151
9.11 故障的排除	151
第 10 章 热成型模具	158
10.1 热成型模具的基本设计原理	158

10.2 热成型模具的材料选择	159
10.2.1 木质模具	159
10.2.2 树脂模具	159
10.2.3 铝质模	160
10.2.4 钢质模具	161
10.2.5 特殊材料成型模具	161
10.3 热成型模具的设计指导	162
10.3.1 侧壁的脱模斜度	162
10.3.2 圆角半径	162
10.3.3 成型模具的表面粗糙度	163
10.3.4 抽气通道的横截面	163
10.3.5 中空部分	164
10.3.6 模具的热平衡	164
10.3.7 成型区域布局	165
10.3.8 生产薄膜铰链和搭扣的模具	167
10.4 预拉伸器	172
10.4.1 预拉伸器的材料	172
10.4.2 预拉伸器的设计	173
10.5 用水提供热平衡的 TF 模具的防腐保护	175
10.6 装配有刀刃的切割工具	176
10.6.1 刀口模的设计	177
10.6.2 冲切时使用的反支撑	179
10.6.3 刀口冲切模的调整	180
10.6.4 刀口冲切模的切割力	180
10.7 剪切模具	182
10.7.1 成型-冲切集成的剪切模的切割力计算	183
10.7.2 下游冲切工位的水平切割面剪切模	185
10.7.3 屋形磨削角剪切模具	186
10.8 封合模具	187

第 1 章

绪 论

热成型是指在高温条件下，将热塑性材料成型为模塑制品的过程。不同的热成型在下列条件中存在差别：

- 加热成型材料至高弹态所需要的再成型温度（第 5 章）
- 模塑成型时通常用的热成型模具（第 4 章）
- 将制品冷却到其不发生尺寸变化的冷却温度（第 6 章）
- 尺寸稳定后制件脱模（第 7 章）

在大多数情况下，热成型的后处理也是必须的，比如：

- 修边
- 熔接
- 粘接
- 热封
- 涂层
- 金属喷镀
- 植绒

热成型如今已经成为加工领域内大家普遍接受的一个术语。“深拉拔”（deep drawing）这个术语专门用于金属材料，而“真空成型”（vacuum forming）和“压力成型”（pressure forming）是指一些特殊的加工过程（见第 4 章）。

热成型的优缺点

判断任何一种加工生产工艺过程是否成功，要与另外一种加工方法相比，用该方法生产的制品的成本是否合适；或者是这两种方法生产的制品成本相同，但用这种方法生产的制品质量得到改进。在许多应用方面，注射模塑成型或吹塑成型都与热成型相竞争。但就包装技术而言，除非是用纸板作为包装材料，否则热成型技术是没有其他加工方法能与之相竞争的。

热成型主要的优点是它的工程经济性。成型复合片材、发泡片材和印刷片材的制品，以适当改变模具来代替变化热成型机械。壁很薄的制品可以用高熔体黏度的片材热成型，而注射相同壁厚的则需要低熔体黏度的粒料。对于少量的模塑件，有利的模具成本是热成型的又一优点，而对大批量的制件，制品能达到非常薄的壁厚及热成型机器的高产出比则非常有利。

热成型可生产的最小制件是药片的包装材料或手表用的电池，也可以生产非常大的制品，比如 3~5m 长的花园水池。

成型材料的厚度可以从 0.05~15mm，对于发泡材料，厚度可达到 60mm。任何一种热塑性塑料或具有相似性能的材料都可以进行热成型加工，常用热塑性塑料及其缩写见表 1-1。

表 1-1 常用热塑性塑料及其缩写

热塑性材料	缩 写
普通聚苯乙烯	PS
耐冲击聚苯乙烯	SB, HIPS
苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物	SBS
取向的聚苯乙烯片材	OPS, BOPS
聚苯乙烯发泡片材	EPS, XPS
苯乙烯-丙烯腈嵌段共聚物	SAN
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物	ABS
丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物	ASA
未增塑的聚氯乙烯	PVC-U
增塑的聚氯乙烯	PVC-P
聚氯乙烯发泡片材	EPVC
高密度聚乙烯	HDPE
低密度聚乙烯	LDPE
聚乙烯发泡片材	EPE
聚丙烯	PP
聚丙烯发泡片材	EPP
聚甲基丙烯酸甲酯	PMMA
聚甲醛	POM
聚碳酸酯	PC
聚碳酸酯发泡片材	EPC
聚酯碳酸酯	PEC(或 PAR)
聚苯醚	PPE(或 PPO)
聚酰胺	PA
聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET
PET ^① , 非结晶的	
PET ^② , 无定形的	
PET ^③ , 严格结晶(伴随成核作用)的取向聚酯片材	OPET
聚酯发泡片材	EPET
聚砒	PSU
聚醚砒	PES
聚苯硫醚	PPS

续表

热塑性材料	缩 写
丙烯腈/甲基丙烯酸酯/丁二烯	A/MMA/B
醋酸纤维素	CA
醋酸丁酸纤维素	CAB
二醋酸纤维素	CdA
聚醚酰亚胺	PEI
热塑性弹性体	TPE
热塑性聚烯烃	TPO

① 也称为 PETG，在热成型过程中与乙二醇共聚不发生结晶，仍保持透明。

② 也称为 APET，若热成型工艺条件恰当（片材成型温度 $<120^{\circ}\text{C}$ ），透明的 APET 片材仍然保持透明。

③ 也称为 CPET，在热成型过程中会得到高结晶度，制品不透明，耐热性好（故片材常用白色颜料着色）。

热成型所用的材料是厚度为 0.05~15mm 的片材，这些片材是用粒料或粉料制得的半成品。因此，与注射成型相比，热成型的原料会增加额外的成本。

在热成型时需要对片材进行切割，这将会产生边角料。将这些边角料粉碎后，与原来的材料相混，可再一次制成片材。

在热成型中，片材只有一个表面与热成型模具相接触，因此只有一个表面与热成型模具几何尺寸相一致，制品另外一个表面的轮廓是由牵伸得到的（参见第 4 章）。

在塑料加工领域，热成型被认为是一种具有很大发展潜力的加工方法。它采用模塑成型，适合塑料包装各领域。热成型也是一种需要熟练操作与经验的加工方法。如今，通过模拟过程与必要的专业技术，热成型已经发展成为在技术上可控的，并且可重复的一种加工方法。

近年来，在热成型过程中产生的边角料的循环利用已日趋重要。如今，边角料通过破碎后与原生材料混合来进行回收利用已经形成了一种工艺。废弃的塑料模塑制品，比如说包装材料，甚至工程制件，它们的回收利用在很多条件下都是可能的，但有些仍有待发展。目前可进行的回收主要是一些化学材料和能源材料。要使循环利用得到突破，必须在加工过程的生态性和节约性上下功夫。

第 2 章

热塑性塑料

2.1 热塑性塑料的化学组成和结构

热塑性塑料是由分子链长度达到 10^{-3}mm 的大分子（聚合物）组成的。这些大分子可以是线性的，比如说 HDPE，也可以是支化的，如 LDPE。大分子完全无序排列（如图 2-1a），我们称之为无定形热塑性塑料。均匀结构的大分子，比如线型聚乙烯或聚甲醛，能形成部分的规则排列，大分子按一定规则部分结晶，我们称之为部分结晶热塑性塑料（如图 2-1b）。

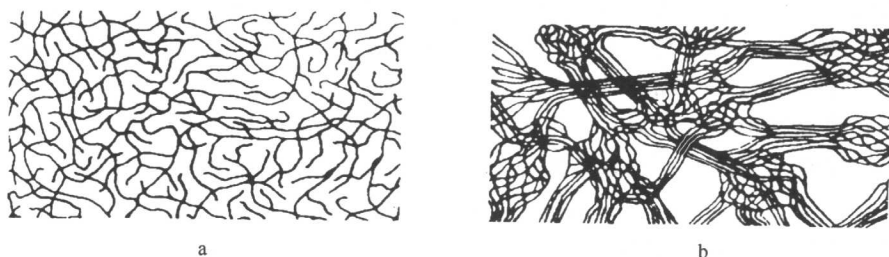


图 2-1 热塑性塑料结构示意图

a 无定形的；b 部分结晶的

无定形和部分结晶热塑性塑料的区别

无定形热塑性塑料由于其不对称结构和/或大侧基，是不结晶的，在不进行改性和着色的情况下均是透明的。无定形热塑性塑料的使用温度应低于其玻璃化转变温度 T_g ，见图 2-2a。部分结晶塑料含有分子链规则排列的区域，称之为结晶区。因为结晶作用，部分结晶的热塑性塑料通常是不透明的，并且透明度会随着结晶度的增加而减小。部分结晶热塑性塑料的使用温度在 T_g 和熔点 T_m 之间。如果 HDPE 的片材被加热到晶体熔点以上，晶体将会熔融，片材将会全部变成无定形，进而透明起来。在冷却过程中，晶体会再次形成。对于许多部分结晶的热塑性塑料而言，结晶作用可以通过将成型的片材和模塑制品快速冷却而得到抑制，最终得到透明的制品（如 PET 瓶，透明的 PET 片材和透明的无规聚丙烯片材）。

图 2-2 说明了无定形和部分结晶热塑性塑料与温度相关的行为，表 2-1 为重要的无定形和部分结晶热塑性塑料。

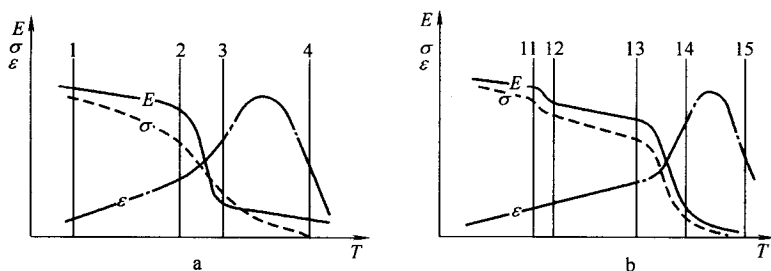


图 2-2 热塑性塑料状态区示意图

a 无定形的；b 部分结晶的

1~2—工作温度；2~3—软化区（玻璃化转变温度 T_g ）；3~4—成型温度区；11~12—无定形部分的软化区（ T_g ）；12~13—工作温度区；13~14—结晶区的熔程（晶体熔融温度 T_m ）；14~15—成型温度区； E —弹性模量； σ —强度； ϵ —热变形率

表 2-1 重要的无定形和部分结晶热塑性塑料

无定形热塑性塑料	部分结晶热塑性塑料
聚氯乙烯(PVC-U 和 PVC-P)	高密度聚乙烯(HDPE)
苯乙烯聚合物(PS、SB、SAN、ABS、ASA)	低密度聚乙烯(LDPE)
聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)	聚丙烯(PP)
聚碳酸酯(PC)	聚酰胺(PA6、PA66、PA11、PA12)
聚苯醚(PPE)	聚甲醛(POM)
纤维素衍生物(CA、CAB、CP)	线型聚酯(PET、PBT)
无定形聚酰胺(PA6-3-T)	聚苯硫醚(PPS)
聚砜(PUS)	
聚醚砜(PES)	

透明的热塑性塑料是无定形的，但并非所有无定形的热塑性塑料都是透明的，比如说进行了着色和改性的无定形塑料就是如此。由于分子链部分有序排列，部分结晶热塑性塑料不再透明，根据结晶度不同，其透明程度也会不同。

无定形和部分结晶的热塑性塑料有一个最高的工作温度范围，参见表 2-4。

在低于玻璃化转变温度 T_g 时（以前称之为软化温度），热塑性塑料通常是非常脆（比如普通聚苯乙烯 PS），热塑性塑料的刚性（模量 E ）和强度（ σ ）会随着温度的升高而降低，但可变形性（ ϵ ）会增大。材料在最高工作温度时，还必须有足够的刚性。热膨胀系数在一定温度范围内可以认为是随温度线性增加的，见表 2-4。