

聚合物加工 原理

〔英〕罗杰 T·芬纳 著
钟平译 · 陈文瑛 校

· 轻工业出版社 ·

聚合物加工原理

[英] 罗杰·T·芬纳 著

钟 平 译

陈文瑛 校

轻工业出版社

内 容 简 介

本书简要地介绍了热塑性聚合物加工的方法，探讨了一些较重要的加工过程，尤其重点介绍两种广泛采用的方法——螺杆挤塑和注塑中的流动和热传递原理，并对这些过程进行了以数学模型为基础的定量分析

本书可供从事聚合物加工工作的技术人员、大专院校的师生参考。

Principles of Polymer Processing

ROGER T FENNER

First Published 1979 by

THE MACMILLAN PRESS LTD

聚合物加工原理

【英】罗杰·T·芬纳 著 钟平 译 陈文瑛 校

●
轻工业出版社出版
(北京广安门南滨河路25号)
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

●
787×1092毫米^{1/32}印张：8字数：173千字

1980年5月 第一版第一次印刷

印数：1—2,000 定价：8.80元

ISBN7-5019-0711-0/TQ·017

目 录

序	(1)
符号说明	(3)
第一章 绪论	(14)
第一节 聚合材料	(14)
第二节 聚合物的加工	(15)
第三节 聚合物加工的分析	(16)
第四节 本书范围	(17)
第二章 主要聚合物加工法导论	(18)
第一节 螺杆挤塑	(18)
一、单螺杆挤塑	(19)
二、多螺杆挤塑	(21)
三、挤塑模头	(21)
四、平膜和片材挤塑	(21)
五、管材挤塑	(23)
六、管膜挤塑	(24)
七、线缆包覆	(25)
第二节 注塑	(26)
一、螺杆注塑机	(26)
二、注塑周期	(27)
三、模具	(28)
第三节 吹塑	(30)
第四节 压延	(31)
第五节 其它加工法	(32)

第六节	加工的影响	(32)
第三章	聚合物的加工性能	(34)
第一节	聚合物的熔融性能和热性能	(34)
第二节	聚合物熔体的粘性	(36)
第三节	测定熔体粘度的方法	(39)
一、	锥板式流变仪	(39)
二、	熔体流动指数的测定	(42)
三、	毛细管式流变仪	(43)
四、	粘度测定方法的比较	(50)
第四节	聚合物熔体的弹性	(51)
第五节	熔体性质与温度和压力的关系	(54)
第六节	固态聚合物的加工性能	(55)
第四章	聚合物熔体流动的基本原理	(57)
第一节	张量标志法	(57)
一、	下标表示法	(58)
二、	求和约定	(58)
三、	总应力和粘性应力	(59)
四、	形变速率张量	(60)
第二节	连续体力学方程	(61)
一、	质量守恒	(61)
二、	动量守恒	(62)
三、	能量守恒	(63)
第三节	基本方程	(64)
一、	斯托克斯流体	(64)
二、	纯剪切流动中材料参量与粘度测定的 关系	(67)
三、	法向应力	(69)

四、拉伸流动	(69)
第四节 边界条件	(71)
第五节 熔体流动的量纲分析	(72)
第六节 润滑近似	(79)
第七节 熔体流动中的混合	(80)
第五章 若干熔体流动过程	(85)
第一节 若干简单挤塑模头	(86)
一、圆形截面模头	(86)
二、平缝模头	(93)
三、环形模头	(98)
四、线缆包覆模头	(100)
第二节 模头和直角机头中的窄流道流动	(103)
一、通过管模支架的流动	(106)
二、线缆包覆直角机头中的熔体流动	(109)
第三节 模头设计中的应用	(114)
一、平膜模头设计	(114)
二、线缆包覆直角机头转向芯的改良设计	(118)
第四节 压延	(120)
一、压延的牛顿流动分析	(122)
二、压延的非牛顿流动分析	(125)
三、压延机辊隙中的混合	(126)
第五节 强剪切薄型膜层中的熔体流动	(127)
一、幂律温度敏感性熔体的非等温拖曳流	(130)
二、熔融成膜	(135)
第六章 螺杆挤塑	(138)
第一节 螺杆挤塑机中的熔体流动	(139)
一、螺杆螺槽熔体流动的无因次参数	(146)

二、牛顿型流动的解法	(150)
三、非牛顿型流动的解法	(154)
四、展开流动的解法	(160)
五、间隙中的流动	(165)
第二节 挤塑机中的固体输送	(167)
一、简单塞流分析	(168)
二、二维塞流分析	(176)
三、固体输送分析的实际含义	(178)
第三节 挤塑机中的熔融	(178)
一、观察到的熔融机理	(179)
二、简单的塔莫尔 (Tadmor) 熔融模型	(182)
三、一种改进的熔融模型	(185)
四、固体床破碎	(195)
第四节 挤塑机功率消耗	(196)
第五节 挤塑机中的混合	(198)
第六节 挤塑机中的波动	(199)
第七节 挤塑机的整机性能和设计	(200)
一、挤塑机的整机性能	(200)
二、设计标准	(202)
三、挤塑机的比例放大	(202)
四、大型挤塑机的设计研究	(204)
第七章 注塑	(209)
第一节 往复式螺杆塑化	(209)
第二节 注射嘴中的熔体流动	(211)
一、注射嘴熔体流动的无因次参数	(212)
二、注射嘴熔体流动的分析	(215)
第三节 模具中的熔体流动和热传递	(218)

一、模腔中的流动机理.....	(218)
二、模腔中熔体流动的无因次参数.....	(219)
三、充模分析.....	(220)
四、模具冷却的分析.....	(227)
附录A 窄流道流动的有限元分析.....	(229)
附录B 螺槽展开熔体流动方程的求解.....	(233)
附录C 熔融模型方程的求解.....	(238)
补充读物.....	(240)

序

由于优于广泛应用的金属和其它工程材料的合成聚合物日益增长的应用，已经带来了将其再加工成有用产品的方法的开发与改进。的确，用这些方法加工聚合材料使其成为人们乐于选择的材料，常常是容易而价廉的。因为较复杂的材料行为，所以聚合物加工可能似乎难于理解和定量地进行分析。

本书的目的是向读者简要介绍热塑性聚合物加工的方法，并探讨一些工业上较重要的过程中的流动和热传递原理。更多注意的是两种极为广泛采用的方法——螺杆挤塑和注塑。为了有助于理解这些加工过程，以及改进加工设备的性能和设计，展开了以这些过程的数学模型为基础的定量分析。除了代数式外，也包括了一些工作实例来说明所得结果的应用。在不可能进行分析求解的情况下，则相当详细讨论了利用数字计算机的数值求解方法，并列举了典型结果。

本书部分根据作者为帝国学院 (Imperial College) 机械和化学工程系大学生和研究生开的课程。所采用的连续体力学和数学属于大学生工程课程中正规教授的水平。虽然为了简明地表示通用连续体力学方程 (第四章) 介绍了张量表示法，但认为无需事先了解，并且在以后的实际应用中未予使用。因而，本书适宜工科大学生和研究生以及同等水平的其它学生。从事聚合物加工的实际工作的工程师也会发现本书有用。

作者愿感谢帝国学院许多同事、学生和技术人员对聚合物加工研究所作的贡献，这些贡献正是本书的牢固基础。第五章列举了有关电缆包覆直角机头设计的许多材料引自 Mrs F. Nadiri 的目前成果。对 Miss E. A. Quin 的非常熟练的打字工作也致以衷心的感谢。

帝国科技学院
伦敦

罗杰·T·芬纳

符号说明

下表中规定了本书正文所用的数学符号。在某些情况下，个别符号在本书不同章、节中有一个以上的含义。只要适当，即在括号中注明适用特定定义的章、节。虽然在每一附录内采用和规定了一些新符号说明，但附录中所用的许多符号都与正文内相同。

- A 沿流动方向的无因次坐标（第四章第五节）
- A 式5.501中规定的函数（第五章第五节一、）
- A 螺槽的横截面积（第六章第二节一、）
- A 式5.6和式7.5的积分常数
- a 锥板式流变仪中锥体的半径
- a_1, a_2, a_3 通用热边界条件公式4.47中的常数
- B 式5.35中的积分常数
- B 式5.101中规定的函数（第五章第五节一、）
- B_r 布林克曼（Brinkman）准数
- b 传动锥板式流变仪的转鼓的半径（第三章第三节一、）
- b 恒定剪切速率下粘度的温度系数
- b_i 体积力矢量
- C 幂律方程中的稠度（粘度）
- C 式5.102中的积分常数（第五章第五节一、）
- C 式6.79中的螺杆几何形状函数（第六章第二节一、）
- C_p （熔体的）比热
- $C_{p,m}$ 某熔体的比热
- $C_{p,s}$ 某固态聚合物的比较

C_1 — C_8 式5.5、5.20、5.32、5.40和5.81中规定的常数

C_1, C_2 式6.92和6.96规定的常数

c 机筒和螺棱顶面的径向间隙

D 圆形流道, 包括流变仪毛细管的直径

D 挤塑机机筒内径 (第六章)

D' 离开毛细管后熔融挤出物的直径

D_0 模腔参考直径

D_1, D_2 锥形圆模头的初始直径和最终直径

E 式5.37中规定的函数 (第五章第一节三、)

E 式5.106中规定的函数 (第五章第五节一、)

E 式6.79中螺杆几何形状函数 (第六章第二节一、)

\dot{E} 挤塑机机筒表面单位面积的功率

E_s 螺槽单位顺流长度的功率消耗

E_r 螺棱单位顺流长度的功率消耗

E_1 上压辊单位长度的功率消耗

e 毛细管末端校正值 (第三章第三节三、)

e 丝的拉伸速率 (第四章第三节四、)

e 螺棱宽度 (第六章)

e_{ij} 形变速率张量

F 作用在压延机辊上每单位辊长度的力 (第五章第四节一、)

F 螺杆进料段中螺棱处的净横向力 (第六章第二节一、)

F_D 拖曳流速率的形状系数

F_p 压力流速率的形状系数

f_D 拖曳流速度的形状系数

- f_p 压力流速度的形状系数
 G 格里菲思 (Griffith) 准数
 G_z 格里茨 (Graetz) 准数
 G_1, G_2 式6.84和6.85中采用的函数
 g 式6.46和6.47中所用的求和计数符号
 g_{ij} 速度梯度张量
 H 流道深度, 包括螺槽和模腔的深度
 H_s 固体床深度
 H_c 平膜模头模唇间距离 (第五章第三节一、)
 H_0 压延机压辊间最小距离 (第五章第四节)
 H_0 薄熔融膜层的初始厚度 (第五章第五节二、)
 H_0 螺槽的初始深度 (第六章第一节四、)
 H_0 模腔参考深度 (第七章第三节三、)
 H_1 平膜模头的初始流道深度 (第五章第三节一、)
 H_1 分离点处压延机压辊间距 (第五章第四节)
 H_1, H_2 锥形平缝模头的初始深度和最终深度 (第五章第一节二、)
 H_1, H_2 式6.84和6.85中采用的函数
 h 锥板式流变仪中流体单元的高度 (第三章第三节一、)
 h 热传递系数 (第四章第四节)
 h 条纹长度 (第四章第七节)
 h 模腔中固体皮层的厚度 (第七章第三节四、)
 I_1, I_2, I_3 形变速率张量的主要不变量
 I_2 第二不变量的无因次式
 K 流道外径与内径之比 (第五章第一节)
 K 式6.78中采用的函数 (第六章第二节一、)
 K (熔体的) 热传导率

- K_m 某熔体的热传导率
- K_s 某固态聚合物的热传导率
- K_1, K_2, K_3 机筒、螺槽侧面和螺杆根部的压缩应力
分别与顺流方向应力之比
- L 流道长度, 包括流变仪毛细管的长度
- L 螺杆轴向长度
- L' 充分发展的流动所需的流道长度
- L_0 压延机中产生压力点与辊隙间的距离
- L_1 薄膜模头中心处模唇的长度 (第五章第五节一、)
- L_1 由压延机辊隙到分离点的距离 (第五章第四节)
- L_1, L_2, L_3 三根流变仪毛细管的长度 (第三章第三节三、)
- l 混合分析中的流体位移 (第四章第七节)
- l 螺距 (第六章)
- M 分布混合程度
- M 式6.80中采用的函数 (第六章第二节一、)
- \bar{M} 平均分布混合度
- M_x 每单位螺槽长度的平均分布混合
- M_{mz} 熔池内顺流质量流率
- M_T 螺槽中总顺流质量流率
- m 平均的螺槽数目 (螺纹头数)
- m 某挤塑机的总的质量流率
- m_{fz} 每单位顺流长度的漏流质量流率
- m_1 每单位膜宽的上熔膜合质量流率
- m_{1x}, m_{1z} x 和 z 方向上每单位膜宽的上熔膜在 x 和 z 方向上的质量流率
- m_{2z} 每单位膜宽的下熔膜顺流质量流率

- $m_{s,z}$ 每单位膜宽度的侧熔膜顺流质量流率
 N 螺杆速度
 n 幂律指数
 n 垂直于流动边界的方向 (第四章第四节)
 n' 对表观剪切速率对数作图的剪切应力曲线的梯度
 P 整个流变仪毛细管的压力降 (第三章第三节三、)
 P 模腔内浇口处的压力 (第七章第三节三、)
 P_0 佩克莱特 (Peclet) 准数
 P_r 径向压力梯度
 P_x x 方向上的压力梯度
 $P_{x,1}$ 螺槽进口处 x 方向上的压力梯度
 P_z z 方向上的压力梯度
 $P_{z,1}$ 螺槽进口处 z 方向上的压力梯度
 P_0 零长度毛细管的压力降
 P 压力
 P 固体塞中作用于顺流方向的压应力 (第六章第二节)
 P_0 进料段开始处的顺流压力
 P_1, P_2 流道进口和出口处的压力
 ΔP 横跨注料嘴的压力差
 Q 体积流率 (在螺槽无限宽的情况下以每单位宽度计, 在挤塑机情况下以每螺槽计)
 Q' 沿平膜模头支管的特定位置上的体积流率
 Q_r 间隙中的顺流体积流率
 Q_L 越过螺棱的漏流体积流率
 Q_s, Q_x, Q_y s, x 和 y 方向上每单位螺槽宽度的体积流率
 Q_0 模腔中的参考体积流率

- Q_1, Q_2, Q_3 熔池内体积流率的分量
- q 表面热传递速率 (第四章第四节)
- q 平膜模头中每单位宽度的体积流率 (第五章第三节一、)
- q 每单位表面面积的熔体流入体积流率 (第五章第五节二、)
- R 压延机压辊半径 (第五章第四节)
- R 由浇口至流锋的径向距离 (第七章第三节三、)
- Re 雷诺 (Reynolds) 准数
- R_0 模腔中参考流锋半径
- R_1 圆盘状模腔外半径
- r 圆柱极坐标系统的径向坐标
- r 距对称轴的流道平均距离
- r_0 模腔参考半径
- r_1, r_2 环形流道的内径和外径
- s 膨胀比 (第三章第四节)
- s 条纹厚度 (第四章第七节)
- s 无因次剪切应力 (第五章第五节一、和第六章第三节三、)
- s 螺槽深度比 (第六章第一节四、)
- s 混合修正的条纹厚度
- s 流动合方向的坐标
- T 温度
- T^* 无因次温度
- T 平均体积温度
- T_b 包括挤塑机机筒的流动边界的温度
- T_m 熔点温度

- T 、 螺杆表面温度
 T_0 粘度测定的参考温度
 T_0^* 式5.98中采用的无因次温度
 T_1 流体进口处温度
 \bar{T}_1, \bar{T}_2 上、下熔膜的平均体积温度
 \bar{T}_{sb} 固体床的平均体积温度
 T_∞ 远离流动边界处的温度
 ΔT 流体内部平均温度增量
 t 时间
 t_{ij} 总应力张量
 t_m 局部记忆时间
 t_m^* 无因次局部记忆时间
 U x 方向上的边界速度 (第三章第二节)
 U^* x 方向上的无因次速度 (第六章第四节一、)
 \bar{U} x 方向上的平均或特征速度
 U_1 流道进口处 x 方向上的无因次速度 (第四章第五节)
 U_1, U_2 压延机压辊的圆周速度
 u x 或 r 方向上的速度分量
 V 毛细管式流变仪活塞的速度 (第三章第三节三、)
 V y 方向上的无因次速度 (第四章第五节)
 V 导线速度 (第五章第一节四、)
 V 相对螺杆的机筒速度 (第六章)
 V_r 相对于固体床的机筒合速度
 V_s 相对边界合速度
 V_{sz} 相对于螺杆的固体床顺流速度
 V_r x 方向上的边界速度
 V_z z 方向上的边界速度