

932990

Verfahrenstechnische
Auslegung von
Plastifizier- und
Schmelzeaggregation

挤出工程设计与计算

〔德〕H.波坦特 著



中国石化出版社

挤出工程设计与计算

〔德〕H.波坦特 著

刘津平 译

陈文瑛 校

中国石化出版社

内 容 提 要

本书总结了近十年来国际上挤出工程原理研究的成果,内容涉及熔体挤出机、常用型塑化挤出机、开槽衬套式挤出机及排气式挤出机。全书共分十章,从挤出量、功率、扭矩、熔融行为、停留时间行为、混合行为和分散行为以至均匀度参数等方面,借助于尽可能简单的理论方程,描述单螺杆挤出机中的复杂关系,与实验比较,其一致性良好。为了便于理解,各章均附有计算示例。本书对指导挤出机设计颇有裨益。

本书可作为高等院校聚合物加工和聚合物加工机械专业师生、同专业科研设计单位、工程技术人员学习参考之用。

Verfahrenstechnische Auslegung Von Plastifizier-und Schmelzeaggregaten

H. Potente

UNIVERSITÄT GESAMTHOCHSCHULE

PADERBORN 1986.

挤出工程设计与计算

〔德〕H.波坦特 著

刘津平 译

陈文瑛 校

中国石化出版社出版

〔北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029〕

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

767×1092毫米 32开本 $6\frac{3}{8}$ 印张 140千字 印1-1920
1991年3月北京第1版 1991年6月北京第1次印刷
ISBN 7-80043-141-X/TH·019 定价:3.05元

序 言

聚合物挤出工程是聚合物工程领域中的重要研究对象之一，也是推动聚合物加工技术进步的原动力。近二十年来，挤出工程理论的研究颇具成效，尤其是与高速数字计算机技术进步相结合，使挤出过程的数学模型日趋完善，并已发展到不依赖经验或经验公式而使挤出机和挤出工艺设计达到最佳程度。

H.波坦特 (Helmut Potente) 教授的原著综述了近几年联邦德国帕德博恩综合大学 (Universität-Gesamthochschule-Paderborn) 塑料工艺专业的挤出工程研究成果，是继70年代初 Z.Tadmor 和 I.Klein 合著《塑化挤出工程原理》

(中译本已于1984年由轻工业出版社出版)之后的一本专著，颇适应促进我国挤出工程研究和挤出机设计进步之需。刘津平同志经 H. 波坦特教授面允，在攻读博士学位之暇将本书译成中文，及时传递国外科研新成果的信息，也是一项“技术引进”工作。因此，我乐于推荐中国石化出版社出版本书，以期国外科研成果为我所用，借以推动我国塑料工程理论研究与应用迅速前进。

陈文瑛

1988年5月于北京

APC 8/101

译者前言

挤出是塑料加工工艺的重要组成部分。为了获得最低能量消耗,最佳混合均匀度和最佳成型效果,人们在有关挤出机机械结构和挤出加工工艺方面做了大量研究工作,对最早的挤出螺杆三段理论作了不少修正和改进,并正致力于应用所得到的新理论,通过计算机取代繁琐的手算工作,以控制制品质量和优化机械设计。

六年来,H.波坦特教授领导下的联邦德国帕德博恩大学塑料工艺专业,对此进行了许多研究工作。1986年7月,H.波坦特教授在帕德博恩市主持召开了较大规模的有关螺杆挤出机优化设计专题讨论会,共有百余名来自联邦德国及其它国家的有关螺杆挤出机研究的专家和学者参加。这次历时两日的专题讨论会,是围绕本书所涉及的内容进行的。本书实质上既是该校最近五年来基于上述目标所进行的科研工作的精华,也是对目前有关挤出机设计基础理论研究的综述。每章都附有计算实例借以说明。因此,这是一本近年来最新有关挤出工程设计与计算的专著。

考虑到这本书的实用性和新颖性,经H.波坦特教授同意,译者在攻读博士学位之余,将此书译成中文,并希望能对我国塑料工业的发展作出一点微薄的贡献。

在翻译及定稿过程中,得到了译者的导师H.波坦特教授和工学博士P.Michel总工程师,工学硕士P.Tappe、A.Fornefeld、M.Koch、S.M.Schultheis、J.Kreiter、

H.Kessler, H.Kaiser和K.Ansahl 等同事们的热情帮助;特别是北京师范大学副教授安文铸博士给了很多具体指导和热情鼓励,在此一并致谢。

中国塑料工程学会副理事长兼秘书长、原轻工业部塑料工业局总工程师、教授级高级工程师陈文瑛同志,对本书译稿进行了校订并撰写了序言, H.波坦特教授又为中译本撰写了序言,特此表示衷心的感谢和深深的敬意。

由于时间仓促和专业知识及德语水平所限,译文难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

刘津平

1987年1月于联邦德国
帕德博恩综合大学

中 文 版 序

本书专门研究塑料加工用单螺杆挤出机的技术设计。它总结了最近六年来联邦德国帕德博恩大学塑料工艺专业所取得的研究成果。参加者有工学博士 P.Michel 和 H.Lappe 以及工学硕士 A.Fornefeld、M.Koch 和 S.Schultheis 等。

我们的目的是借助于尽可能简单的方程，描述单螺杆挤出机中的复杂关系而与实际情况无大偏差。为了便于读者理解和掌握所介绍的理论，每章都附有计算示例。

本书所介绍的内容，已首次在1986年7月举行的为期两日的专题讨论会上发表，得到了很大的反响。

有关的科研工作得到了联邦德国科学协会（DFG）以及 BASF、Hüls、Dow、Battenfeld 和 Arburg 等公司在经济和物资方面的支持。

刘津平先生建议将本书译成中文，并承担了这繁重的翻译任务，特此表示感谢。



1987年2月11日于帕德博恩

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	2
第 2 章 塑化与熔融装置的挤出量计算	3
2.1 熔体挤出机的挤出行为	3
2.1.1 牛顿熔体	3
2.1.1.1 几何及工艺参数的说明	3
2.1.1.2 等深螺槽的单段螺杆(一维流动)	6
2.1.1.3 不等深螺槽的单段螺杆(一维流动)	8
2.1.1.4 三段螺杆(一维流动)(不同单段螺杆几何形状 的串联)	9
2.1.2 结构粘性熔体	10
2.1.2.1 等深螺槽的单段螺杆(一维流动)	10
2.1.2.2 不等深螺槽的单段螺杆(一维流动)	12
2.1.2.3 三段螺杆(一维流动)	13
2.1.2.4 三段螺杆(二维流动)	13
2.1.2.5 三段螺杆(受螺棱影响的多维流动)	14
2.2 塑化挤出机(结构粘性物料,多维流动)	15
2.2.1 三段螺杆(常用型)	15
2.2.2 多段螺杆(常用型)	18
2.3 强制输送型挤出机	18
2.3.1 几何形状和参数的说明	18
2.3.2 挤出量计算	19
2.4 关于压力形成的计量段螺纹升角的优化	22
2.4.1 常用型塑化装置	22

2.4.2 强制输送型塑化装置	24
2.5 计算示例(常用型挤出机)	25
参考文献	31
第3章 剪切元件和混合元件	35
3.1 剪切元件和混合元件的任务	35
3.2 剪切元件和混合元件的压力行为和挤出行为	36
3.2.1 圆柱形和圆锥形剪切元件	37
3.2.2 Tröster 剪切元件	40
3.2.3 Maddock 剪切元件	42
3.2.4 混合元件	45
3.3 具有剪切元件和混合元件的多段螺杆	46
3.4 停留时间、剪切速率、剪切形变和剪切应力	52
3.4.1 平均停留时间	53
3.4.2 平均剪切速率和剪切应力	53
3.4.3 剪切形变	59
3.5 计算示例	64
参考文献	69
第4章 排气式塑化装置的设计与计算	71
4.1 排气式装置的工作原理	71
4.1.1 第一级螺杆	71
4.1.1.1 无压输送型多段螺杆	71
4.1.1.1.1 常用型塑化装置	72
4.1.1.1.2 在第一级计量段中设置剪切元件以改善 挤出效果	72
4.1.1.2 强制输送型塑化装置	73
4.1.2 第二级螺杆	74
4.1.2.1 边界条件和工作原理的说明	74
4.1.2.2 第二级螺杆挤出量的确定	74
4.1.2.3 第二级计量段的优化	75

4.2	计算示例	79
	参考文献	85
第 5 章	功率、扭矩及剪切应力的计算	86
5.1	绪言	86
5.2	熔体挤出机	86
5.3	塑化挤出机	92
5.3.1	常用型挤出机	92
5.3.2	开槽衬套式挤出机	96
5.3.3	常用型塑化挤出机螺杆梢部前熔体温度的计算	98
5.4	计算示例	98
	参考文献	101
第 6 章	熔融分布与压力分布的计算	102
6.1	绪言	102
6.2	熔融过程	102
6.2.1	模型介绍	103
6.2.2	熔膜厚度的计算	104
6.2.3	熔融分布的计算	108
6.3	初始熔融(熔池形成与沿螺杆的压力分布)	114
6.4	三段螺杆的探讨	118
6.5	计算的影响因素	122
6.6	计算示例	123
	参考文献	134
第 7 章	停留时间行为与纵向混合度	136
7.1	停留时间	136
7.1.1	停留时间分布函数	136
7.1.2	熔体挤出机中最短及平均停留时间的确定	140
7.1.3	三段式塑化挤出机中最短及平均停留时间的确定	142
7.2	衡量纵向混合优度的停留时间分布方差	145

7.3 计算示例	145
参考文献	148
第8章 层状剪切混合度	149
8.1 绪言	149
8.2 混合过程理论	149
8.3 剪切形变的计算	153
8.4 混合优度实验值与理论计算值的比较	155
8.5 计算示例	156
参考文献	158
第9章 螺杆挤出机中的分散	160
9.1 迄今的理论评价	160
9.2 料团分散函数	163
9.3 螺杆挤出机中的料团破碎	168
9.4 简单剪切间隙的模拟定律	172
9.5 计算示例	173
参考文献	176
第10章 均匀度矢量	177
10.1 均匀度矢量的定义	177
10.2 计算示例	180
符号说明	181

第1章 绪 论

熔体挤出机主要承担输送、均化和成型的任务，而塑化挤出机则同时作为粒状和粉状塑料的输送、熔化、匀化和成型设备。迄今已有大量有关这两类挤出机的文献。

对于熔体挤出机，当熔体遵循牛顿流动行为时，还能相当简单地将其视为等温状态而进行计算。然而，对于具有结构粘性流动行为的熔体，就不再能根据非线性流动定律来求完全解了。因为所述有关粘度的偏微分方程相互耦合，只有用数值方法才能求解。

对于塑化挤出机，实际情况还更为复杂。在此，必须将固体输送模型和熔融模型、熔体输送模型以及均化模型结合起来。这项任务只能借助于大型计算机来完成，但其最终结果往往不比由有经验的工程师用较简单的估算方法得到的结果好多少。

因此，在处理这类行为时，首先转向应用相似理论亦即模拟方程，对几何尺寸已知的挤出机进行推算。这些用于螺杆挤出机的模拟理论，已于1981年首次发表⁽¹⁾，同时已经受了实践的检验，因而在此不再讨论。

本书的任务是阐明常用典型挤出机的计算可能性。这些方法和计算基础，主要是帕德博恩综合大学塑料工艺专业最近五年的科研成果，其中许多成果至今尚未发表。

在计算基础的研究过程中，我们从下列原则出发：

- (1) 假设条件应尽可能少；

(2) 假设条件应尽可能简单;

(3) 只要数值解或分析解太复杂,即用近似方程替代;

(4) 对于数理性太复杂的过程,采用相似原理,即量纲分析与实验相结合;

(5) 优先考虑无量纲表达式,因为这样可减少变量数目;

(6) 对于统计过程,例如停留时间分布,则从数学上充分肯定的分布函数出发;

(7) 对于流体力学,热传递和材料力学同时起作用的过程,例如分散过程,则采用所述的类比推理方程。这些方程中的常数由实验确定之。

所涉及的内容有单螺杆挤出机,亦即熔体挤出机、常用型塑化挤出机,开槽衬套式挤出机和排气式挤出机。本书力图从挤出量、功率、扭矩、熔化行为、停留时间行为、混合行为及分散行为以至均匀度参数,提供一套完整的计算方法,并通过计算例题阐明理论公式。

这里介绍的理论公式已进一步经实验室规模的验证,或与引自文献的实验值进行了比较,其一致性是令人满意的,但尚未经实践的检验。因此,应该首先用理论公式设计常用的挤出机,然后用模型理论进行推算。

原则上可以说,这些理论结果总是象那些本构方程,亦即物质定律一样满意。若应用不正确的物料数据,则计算结果可能与实际有明显的偏差。

参 考 文 献

- [1] Potente, H. Auslegen von Schneckenmaschinenbaureihen-Modellgesetze und ihre Anwendung. Kunststoff-Fortschrittsberichte, Band 6 Carl Hanser-Verlag, München/Wien. 1981.

第2章 塑化与熔融装置的挤出量计算

2.1 熔体挤出机的挤出行为

2.1.1 牛顿熔体

单螺杆挤出机的挤出行为，受所用物料、螺杆尺寸、工艺参数以及模头背压的影响^[1~6]。为了评价挤出行为，有必要建立一物理模型。

2.1.1.1 几何及工艺参数的说明

图2.1表示一单段螺杆。它以转速 n_0 在直径为 D 的机筒中运动。图中标明的其它参数为：螺杆与机筒的径向间隙 δ ，螺槽深度 h ，螺顶宽度 e ，螺槽宽度 b ，螺距 t ，以及由此形成的螺纹升角 φ 。

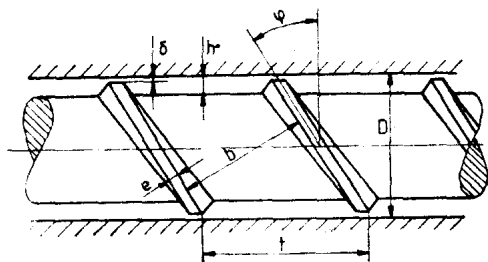


图 2.1 单头螺杆的几何模型

同时，螺槽宽度 b 可按方程(1)计算，螺纹升角 φ 可按方程(2)计算。

$$b = t \cdot \cos \varphi - e \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{t}{\pi \cdot D} \right) \quad (2)$$

为了计算流动过程，我们考虑将螺槽展开〔1, 3, 7~11〕，于是，在挤出过程中，螺杆不应运动而机筒则应围绕螺杆旋转，以致形成一平板在展开的螺槽模型上方运动。图 2.2 表示这种运动情况。

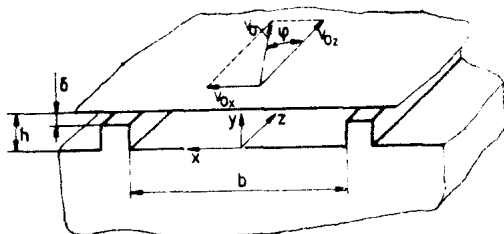


图 2.2 展开螺槽的几何模型

此时，圆周速度 v_0 ：

$$v_0 = \pi \cdot D \cdot n_0 \quad (3)$$

分解为沿 x 方向的分速度：

$$v_{0x} = v_0 \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

和沿 z 方向的分速度：

$$v_{0z} = v_0 \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

进一步计算所需的螺槽长 Z ，可按方程 (6) 进行：

$$Z = L / \sin \varphi \quad (6)$$

式中， L 为螺杆总长度，可通过长径比 L/D 计算。因此，计算必需的所有几何数据都明确确定。但是，为使计算尽可能准确，必须考虑更精确的螺槽几何形状，此几何形状一般与矩形有所不同。螺槽几何形状可能出现图 2.3 所示的三种形

状^[12]。第一种是在矩形槽根与螺杆基面相交处作成半径为 r_1 的圆弧，当然该圆弧半径小于螺槽深度。第二种情况如图2.3 b) 所示，槽弧半径 r_2 大于螺槽深度 h 。第三种情况是螺面角 γ 大于 90° ，如图2.3 c) 所示。

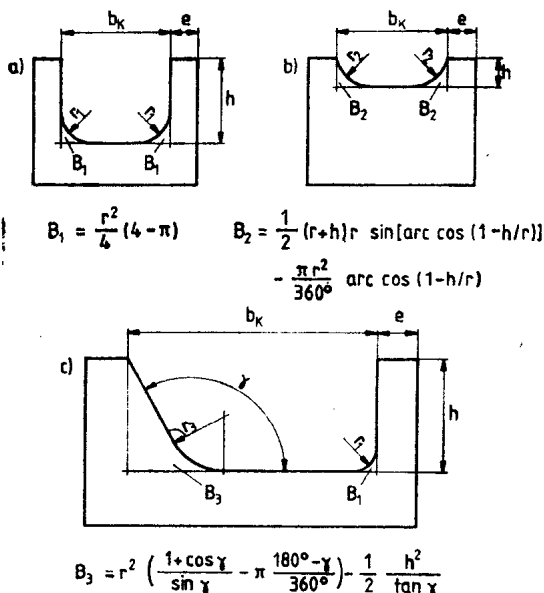


图 2.3 螺槽中由于圆弧引起的面积损失示意图

于是，由上述三种情况可见，每个螺槽面积都应减去面积 B 。待减去的面积 B_1 、 B_2 和 B_3 的计算，可按照 (7) ~ (9) 式进行：

$$B_1 = \frac{r_1^2}{4} (4 - \pi) \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} (r_2 + h) r_2 \cdot \sin[\arccos(1 - h/r_2)] - \frac{\pi \cdot r_2^2}{360^\circ} \cdot \arccos(1 - h/r_2) \quad (8)$$

$$B_3 = r_3^2 \left(\frac{1 + \cos \gamma}{\sin \gamma} - \pi \cdot \frac{180^\circ - \gamma}{360^\circ} \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^2}{\tan \gamma} \quad (9)$$

于是,矩形螺槽面积必须减去待减去的推进面面积(B_t)和非推进面面积(B_{nt})。然后,计算修正的螺槽宽度 b ,可由实际(修正后的)螺槽面积 A_k ●除以螺槽深度 h 求得。其含义再综述于(10)及(11)式:

$$A_k = b_k \cdot h - B_{nt} - B_t \quad (10)$$

$$b = \frac{A_k}{h} \quad (11)$$

因此,所有几何参数都是已知的。

2.1.1.2 等深螺槽的单段螺杆(一维流动)

为了推导流动分布方程,我们从一般运动微分方程出发^[10]。当然,为了能求解就必须预先设定或者说遵守各种边界条件^[1~3]。这些条件是:

- (1) 存在一种充分发展的流动分布。
- (2) 在螺槽根部,即 $y=0$ 处, z 向速度为零。
- (3) 在 $y=h$ 处,螺槽内速度等于 z 向圆周分速度 v_{0z} 。
- (4) 螺槽宽度 b 颇大于螺槽深度 h 。
- (5) 采用牛顿流动定律处理物料行为:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (12)$$

式中, τ 为剪切应力, η 为粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

利用上述假设条件和运动方程,因此得到微分方程:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

● 原书误为 A ,已更正。——校注