

·塔莫尔  
·克莱因 编著

# 挤出 塑化 工程 原理

[美]

夏廷文  
许澍华  
朱复华  
闫琦  
耿孝正 译

工业出版社

# 塑化挤出工程原理

〔美〕 Z·塔莫尔 著  
I·克莱因

夏廷文 阎琦 译  
许谢华 耿孝正

尹自鱼 校

## 内 容 提 要

本书是美国聚合物科学与工程丛书之一，系美国塑料工程师协会公司的高级研究员Z·塔莫尔和I·克莱因所著。本书是该领域中的代表性著作之一。

本书对塑化挤出原理进行了统一的完整的阐述，以丰富的科学实验资料为基础，结构严谨，内容实用，叙述深入浅出，并提出了有关课题的定量处理。

全书共分十一章。书中介绍了研究塑化挤出的基本知识，详细论述了塑化挤出的基本理论：固体输送、熔融、熔体输送和混合。对塑化挤出机的数学模型和模拟的研究、挤出稳定性和挤出质量、实验的温度和压力测量，以及塑化挤出过程的统计分析方法均有专章叙述。此外，为便于阅读，在附录中附有一简明易懂的矢量和张量记法摘要。

本书可作为高等院校聚合物加工和聚合物加工机械专业高年级生和研究生的教材，并可供有关专业师生以及有关研究、工程技术人员参考。

ZEHEV TADMOR and IMRICH KLEIN  
ENGINEERING PRINCIPLES OF PLASTICATING  
EXTRUSION  
VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY New York 1970

### 塑化挤出工程原理

〔美〕 Z·塔莫尔 著  
I·克莱因

夏廷文 阎琦 译  
许澍华 耿孝正  
朱复华

尹自鱼 校

\*

轻工业出版社出版

(北京阜成路3号)

张掖地区河西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

\*

787×1092毫米1/32 开本，13 字数：396千字

1984年4月 第一版第一次印刷

印数：1—10,000 定价：2.05元

统一书号：15042·1813

## 译者的话

本书系聚合物科学与工程丛书之一，书名为《塑化挤出工程原理》，是塑料工程师协会公司的高级研究员 Z·塔莫尔和 I·克莱因编著的。该书由 VNR 公司在 1970 年出版，是六十年代以来该领域中的代表性著作之一。

本书对塑化挤出原理第一次给出了一个统一的完整的阐述。其特点是在大量科学实验基础上写出的，结构严谨，对挤出理论的发展历史、建立模型的基本思路、数学模型的推导、模型的实验验证，以及模型中各项的物理意义等均作了深刻的说明。内容丰富实用，叙述深入浅出，并尽可能地提出有关课题的定量处理。此外，在各部分中附有必要的分析计算实例，以利于读者对内容的理解和应用。为阅读本书所需要的数学基础，以初等微分方程为限，可是对缺少这部分知识的读者，本书也是很有用的。

本书是一部挤出工程的教科书，同时也是一部专业科技书，虽然出版于 1970 年，但并未因此而失去其理论和实用的价值，在现今有关挤出课题的研究论文中，一直被引用为重要的参考文献，故本书可作为我国高等院校聚合物加工和聚合物加工机械专业高年级生和研究生的教材，并可供有关专业师生以及有关研究、工程技术人员参考。

本书由夏廷文译第一、二、三章和附录 A，许瀚华译第四、七章，朱复华译第五、九章，阎琦译第六、十一章和附录 B、C、D，耿孝正译第八、十章。全书由尹自鱼同志校阅，在译校过程中，对所发现的错误，均作了改正，并加了

译注。由于本书是一部专著，限于译校者水平，书中译文不当之处，热切欢迎读者批评指正。

1982年12月

## 塑料工程师协会公司的聚合物 科学与工程丛书

塑料工程师协会创建于1941年，它是一个代表塑料工程行业的国际性组织。协会的主要目的是增进同塑料有关的科学和工程知识。自协会建立以来，通过技术会议和各专业委员会的工作，促进了技术情报的交流。此外，协会还主办了“SPE期刊”和“聚合物工程与科学”两种技术杂志。

在协会致力于传播科学情报的任务中，塑料工程师协会鼓励专业会员编著了一套关于塑料工程各种题材方面的书。这一套书称为塑料工程丛书；其中已出版了两本：《塑料工程师用的质量控制》（1957）和《热塑性材料的加工》（1959）。但是，这套原始的塑料工程丛书，后来分为“聚合物科学与工程丛书”和“聚合物工艺丛书”。

## 序 言

塑化挤出同熔体挤出相反，在塑化挤出中发生固体物料的熔融。鉴于过去十年在这方面发展的成就，已充分表明，着手编写塑化挤出这本书的工作，是迫切需要的。

这本书的主要目的，是增进对塑化挤出原理的了解。这些原理不仅适用于塑化挤出机，而且也适用于螺杆注射成型机和吹塑成型机。

这本书是为从事塑料工业的工程师写的，在他们日常工作中，了解复杂的塑化挤出过程时，会发现这本书是有用的；同时，这本书也是为新参加这方面工作的大学生和工程师写的。写这本书，主要是为了提供一种统一的塑化挤出原理的描述，说明这些原理在理论上和实验上的正确性，同时略述这些原理的某些不足和局限性。本文始终努力着重于所讨论内容的实际意义，尽可能提出课题的定量处理，因为这是将工程知识用于实践的唯一方法。本书所需要的数学基础，不超过初等微分方程的知识；可是，对缺少这个基础的读者，本书也是有用的。为了便于独自研究，每当必须应用稍高深的数学工具时，推导尤为详细。在正规的学习中，这本书预定作为大学高年级生和研究生在聚合物加工课程中挤出方面的教科书。

第四章、第五章和第六章是关键的几章，这三章分别论述了塑化挤出的三个职能区：固体输送、熔融和熔体输送。前面几章是：一章导论，一章叙述热量和动量输送基本方程，以及有关的流变模型，一章关于螺杆几何参数及全书中应用的一些基本假定。在各职能区论述的后面是第七章，这

一章讨论混合与停留时间的分布。在第八章中，试图说明如何把前七章中描述的各种理论归纳为一个总的数学模型的方法。由于有许多建立数学模型的方法，这里不对个别的数学模型进行详述，对以前发表过的模型，只提供参考文献。此外，对数学模型给出的答案作了讨论。但是，必须指出，由于过程的复杂性，一个数学模型，必须具有能用于计算机程序的形式。实际上可以指出，在很大程度上，高速数字计算机的利用，推动了过去十年在这方面的发展。第九章论述的是挤出质量，其后一章是关于测量温度和压力的实验方法，以及有关现代温控技术的简述。最后一章，简述了对塑化挤出过程定量分析的另一种方法，为了找出复杂过程中众多变量之间的关系，这种方法涉及到统计工具的应用。

塑化挤出原理的研究项目是在西方电气有限公司着手的，我们衷心感谢他们对编写原稿工作所给予的帮助。同样感谢西方电气有限公司工程研究中心的普林斯顿(N. J. Princeton)为我们提供了所有的插图。我们更衷心感谢以前塑料团体中同事们的帮助。尤其要衷心感谢杜威德万(I. J. Duvdevani)博士，书中经常提到他为指导本书工作所作的贡献；马歇尔(D. I. Marshall)博士和多诺万(R. C. Donovan)博士审阅了部分章节，并作出了有益的注释，以及赫德(C. B. Heard)，莱弗逊(L. D. Liversen)，卡普(A. Karp)，威科夫(C. C. Wyckoff)和泰勒(J. J. Taylor)各位先生，他们完成了书中所报导的绝大部分实验工作。最后，对以色列技术工艺学院的雷斯尼克(W. Resnick)教授的鼓励和帮助、有助于完成这项编写计划，我们致以真诚的感谢。

Z. 塔莫尔

I. 克莱因



# 目 录

|            |                          |      |
|------------|--------------------------|------|
| <b>第一章</b> | <b>塑化挤出的导论</b> .....     | (1)  |
| 1.1        | 历史.....                  | (1)  |
| 1.2        | 塑化挤出机.....               | (2)  |
|            | 参考文献.....                | (11) |
| <b>第二章</b> | <b>流动的基本概念</b> .....     | (17) |
| 2.1        | 引言.....                  | (12) |
| 2.2        | 连续性方程、动量方程和能量方程.....     | (12) |
| 2.3        | 牛顿流体.....                | (22) |
| 2.4        | 非牛顿流体.....               | (27) |
| 2.5        | 温度对流动特性的影响.....          | (37) |
| 2.6        | 压力对流动特性的影响.....          | (40) |
|            | 参考文献.....                | (40) |
| <b>第三章</b> | <b>螺杆几何参数和基本假定</b> ..... | (43) |
| 3.1        | 挤出机螺杆的几何参数.....          | (43) |
| 3.2        | 静止螺杆和旋转机筒的假定.....        | (49) |
| 3.3        | 润滑近似.....                | (51) |
| 3.4        | 流体对壁的粘附.....             | (52) |
|            | 参考文献.....                | (54) |
| <b>第四章</b> | <b>固体输送区</b> .....       | (55) |
| 4.1        | 引言.....                  | (55) |
| 4.2        | 摩擦.....                  | (56) |
| 4.3        | 输送机理.....                | (59) |
| 4.4        | 流率.....                  | (62) |

|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 4.5        | 力和力矩的平衡·····                  | (66)         |
| 4.6        | 流率方程的讨论·····                  | (72)         |
| 4.7        | 压力分布·····                     | (77)         |
| 4.8        | 实验验证·····                     | (79)         |
|            | 参考文献·····                     | (89)         |
| <b>第五章</b> | <b>熔融区·····</b>               | <b>(92)</b>  |
| 5.1        | 引言·····                       | (92)         |
| 5.2        | 实验·····                       | (93)         |
| 5.3        | 熔融机理——定性的·····                | (99)         |
| 5.4        | 理论模型·····                     | (123)        |
| 5.5        | 牛顿模型·····                     | (128)        |
| 5.6        | 牛顿模型的实验验证·····                | (149)        |
| 5.7        | 修正的牛顿模型·····                  | (154)        |
| 5.8        | 非牛顿模型·····                    | (155)        |
| 5.9        | 熔融所消耗的功率·····                 | (167)        |
| 5.10       | 螺棱间隙对熔融的影响·····               | (168)        |
| 5.11       | 螺槽曲率对熔融模型的影响·····             | (171)        |
| 5.12       | 修正了的非牛顿模型的实验验证·····           | (180)        |
| 5.13       | 不同的操作条件和螺杆几何参数对熔融的<br>影响····· | (191)        |
|            | 参考文献·····                     | (211)        |
| <b>第六章</b> | <b>熔体输送区·····</b>             | <b>(213)</b> |
| 6.1        | 引言·····                       | (213)        |
| 6.2        | 建立在浅棱柱形螺槽内流动基础上的模型·····       | (214)        |
| 6.3        | 深弯曲螺槽中熔体挤出的理论·····            | (345)        |
|            | 参考文献·····                     | (382)        |
| <b>第七章</b> | <b>挤出机中的混合·····</b>           | <b>(387)</b> |

|            |                    |       |
|------------|--------------------|-------|
| 7.1        | 引言                 | (389) |
| 7.2        | 条纹间隔               | (387) |
| 7.3        | 挤出机内的停留时间分布        | (395) |
| 7.4        | 挤出机内的总变形分布         | (406) |
| 7.5        | 加权平均总变形            | (414) |
|            | 参考文献               | (420) |
| <b>第八章</b> | <b>塑化挤出机的数学模型</b>  | (421) |
| 8.1        | 引言                 | (421) |
| 8.2        | 数学模型的描述            | (423) |
| 8.3        | 理论与实验的一致           | (427) |
| 8.4        | 计算机模拟塑化挤出的研究       | (438) |
|            | 参考文献               | (466) |
| <b>第九章</b> | <b>挤出稳定性和挤出物质量</b> | (467) |
| 9.1        | 挤出质量的定义            | (467) |
| 9.2        | 稳定状态的质量            | (468) |
| 9.3        | “不稳定状态的质量”         | (471) |
| 9.4        | 波动的来源              | (478) |
| 9.5        | 操作条件对不稳定状态的质的影响    | (482) |
| 9.6        | 螺杆几何参数对不稳定状态的质的影响  | (489) |
| 9.7        | 挤出稳定性理论            | (494) |
| 9.8        | 混合螺杆               | (495) |
|            | 参考文献               | (495) |
| <b>第十章</b> | <b>实验的温度和压力测量</b>  | (497) |
| 10.1       | 温度控制               | (497) |
| 10.2       | 熔体用热电偶             | (499) |
| 10.3       | 聚合物熔体温度的测量理论       | (506) |
| 10.4       | 挤出机中的压力测量          | (515) |

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| 参考文献                   | (518)        |
| <b>第十一章 挤出过程的统计分析</b>  | <b>(520)</b> |
| 11.1 引言                | (520)        |
| 11.2 实例                | (524)        |
| 参考文献                   | (534)        |
| 附录 A: 第二章内使用的矢量和张量记法摘要 | (535)        |
| 附录 B: 常数和换算系数          | (544)        |
| 附录 C: 一些聚合物的流动特性       | (546)        |
| 附录 D: 符号说明             | (551)        |

## 第一章 塑化挤出的导论

在过去几十年中，各种合成聚合物的生产和应用有了巨大的增长。与聚合物加工成实用制品有关的聚合物加工领域，随着聚合物工业相应发展起来。以圆形机筒中带有一根旋转的阿基米德螺杆显著特点的挤出工艺。是现今最重要的聚合物加工方法。实际上大部分聚合物从聚合反应器到成品的生产过程中，至少要通过挤出机一次。这种螺杆-机筒组件是所有加工机组包括塑化挤出机、熔体挤出机以及注射成型和吹塑成型机的主要部件。

“挤出”这个词来源于拉丁文“ex”（离去）和“trudere”（推），这准确地说明了过程本身象是“靠施加压力通过机头成型的”。螺杆挤出机高效地、连续地使固体聚合物变成熔体，并在高压下把很高粘度的熔体泵出机头。

### 1.1 历史

最早记载的工业挤出机，据说是布拉默（J. Bramah）在1795年发明的。它是一个手动的柱塞和机头组件，用于连续制造铅管<sup>[1]</sup>。采用阿基米德螺杆挤出机的第一个专利是英国格雷（Gray）<sup>[2]</sup>和美国罗伊尔（Royle）<sup>[3]</sup>得到许可的。自十九世纪中叶一直到现在的合成聚合物工业的发展，挤出加工曾应用于古塔波胶、橡胶、硝酸纤维素和酪蛋白<sup>[4]</sup>的加工。约在1925年，挤出了各种型式的聚氯乙烯，这标志着现代挤出工艺的开端。大约也在那个时期，罗厄尔（Rowell）和芬利森（Finlayson）进行了螺杆挤出机的第一个理论研究（第

六章的文献〔1〕和〔2〕)。

专门为热塑性塑料设计的第一台螺杆挤出机，似乎是在1935年由德国人特罗斯特 (P. Troester) 制造成功的。塑化挤出机的发展和应用很可能更早些，正如菲希尔 (Fisher)<sup>[4]</sup>所指出：由于同行业的保密，没有专利记载，所以历史模糊。但是，最近关于挤出机发展方面的详细评论把它的早期历史弄的比较清楚了<sup>[5]</sup>。

## 1.2 塑化挤出机

现今挤出机机筒的直径在1~12英寸之间变化 (虽然已经造出了机筒直径为36英寸的挤出机)。这些机器高速率地挤出了很多种产品。其中有电缆和电线、管、薄膜、板材、纸和其它基料的涂层物、单丝以及各种形状的型材。图1.1至图1.7示出各种尺寸的挤出机和一些普通螺杆。

固体聚合物通常是以粒状、片状、珠状、粉状或其它形状加入挤出机料斗的，如图1.8所示。这种固体料可以由均聚物、共聚物或混聚物组成，可以是带有如增塑剂、抗氧化剂、颜料、润滑剂、发泡剂、填料等各种添加剂的混合物。在全书中，不论对加入挤出机内的混合物的成分如何，都统称为“聚合物”。但是，必须记得，对加入物料成分的任何改变，无论是由于混合物添加剂的改变，还是量入料斗的色母剂的改变，都会影响“聚合物”的物理性质，因而也影响整个挤出作用。例如，加少量添加剂到硬聚氯乙烯混合物中，可以对整个挤出过程有很大影响。所以，在计算中使用的物理性质必须是这种混合物的物理性质而不是主要成分的物理性质。

在高温高压下固体聚合物被熔融、匀化并被泵出机头。

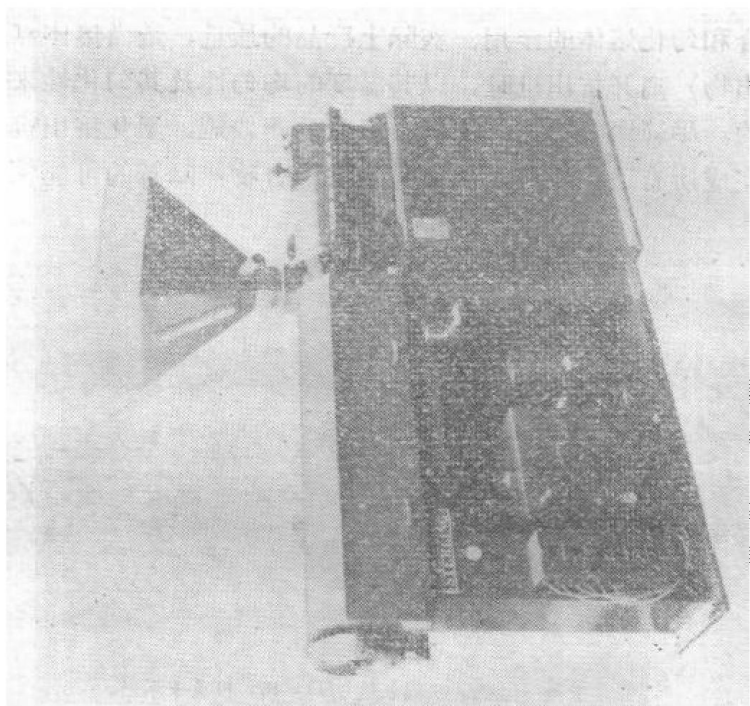


图 1.1

Sterling 排气挤出机直径2.5英寸, $L/D = 24$ ,推力轴承和齿轮减速为整体结构。(Sterling 有限公司供图)

用固体聚合物供料的挤出机称为“塑化挤出机”。既然是这样称谓，挤出机是优于高效泵的，因为它还必须供给热能来熔化聚合物。为了这一目的，有两种能量来源：（1）挤出机的机筒装有加热器，通过热传导把热能供给聚合物；（2）通过转动轴传入机械能，并由粘性耗散转变为热能。有时，挤出机在没有前一种热源下工作，这就是熟知的各种自热挤出机或自生热挤出机。在这种挤出机中，全部能量是通过轴输入的。

螺杆挤出机除了向机头输送聚合物和熔融固体外，还有混合和匀化熔体的作用。实际上产品的质量，是当熔体（即挤出物）离开挤出机时，以其温度的均匀性及其匀化性来衡量的。尽管聚合物在挤出机中停留时间较短，塑化挤出机仍能完成所有这些任务，从而防止了聚合物热降解的可能性。

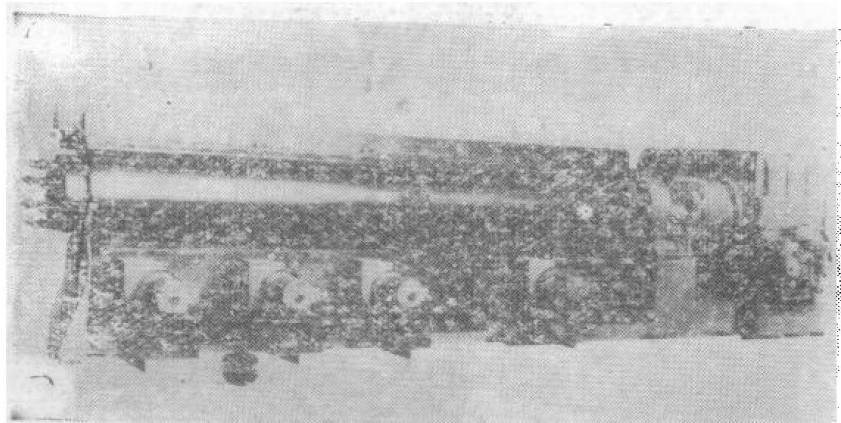


图 1.2

8.5英寸塑料挤出机。机筒长度 $L/D=20$ 。机头未示出。

(John Royle & Sons供图)

靠螺杆和机筒的相对运动，使固体和熔体向前泵送。这个输送机理类似于在夹在扳手上的螺母中旋转螺栓。通常，螺栓在螺母中前进，但当螺栓实际上被阻止前进时，正象所提到的挤出机那样，螺母就要在扳手内滑动。同理，物料就在螺杆与机筒之间“滑动”。可以使用右旋或左旋螺杆。螺杆由马达通过齿轮箱带动旋转，并由一止推轴承使螺杆不致被机头处产生的压力推出机筒。螺杆在具有很小间隙的机筒中“浮动”；在螺棱顶部与机筒之间的聚合物起着润滑作用。通常螺杆具有单螺纹，但也可以是双螺纹或多螺纹螺杆，并且正在被制造之中。正象后面各章所讨论的那样，增



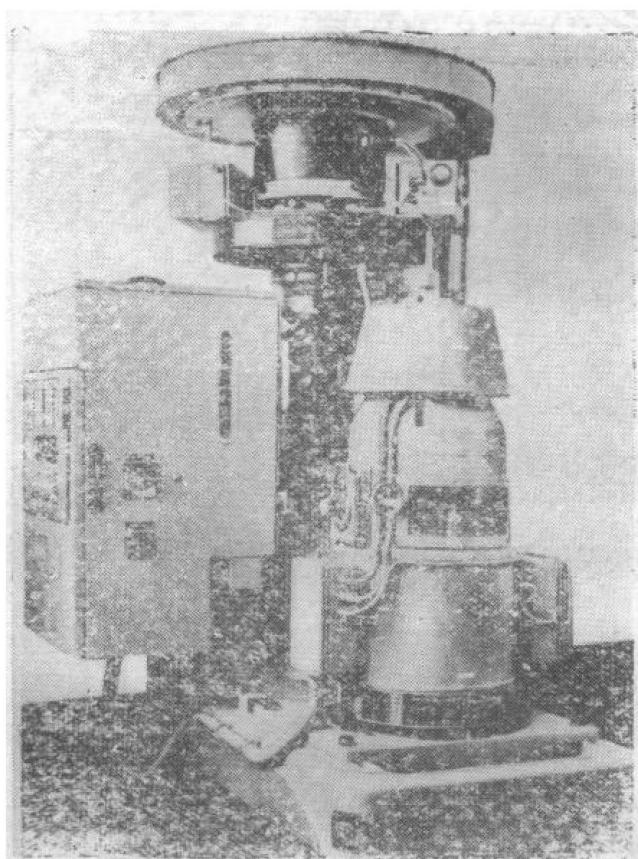


图 1.3

带有旋转吹膜机头的SV050.1立式挤出机。螺杆直径为 50 毫米；有效螺杆长度 $L/D=12$ ；螺杆转速120~400转/分。

(Reifenhäuser供图)

加螺纹头数优点很少或者没有好处。螺杆是用钢材制造的，而且，为了保护螺杆，常常要淬硬。但是，螺杆随着使用时间的增加而磨损，当螺棱和机筒间的间隙扩大到超过规定的限度时，必须更换螺杆。机筒也是用钢材制造的，而且机筒内表面或者淬硬，或是常常涂以特殊的耐磨涂层。然而，机