

精密挤出成型原理及技术

吴大鸣 刘颖 李晓林 等编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

精密挤出成型原理及技术/吴大鸣, 刘颖, 李晓林等编
著. —北京: 化学工业出版社, 2004.7

ISBN 7-5025-5505-6

I. 精… II. ①吴…②刘…③李… III. 挤出成型
IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043854 号

精密挤出成型原理及技术

吴大鸣 刘颖 李晓林 等编著

责任编辑: 王苏平

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

中国纺织工业出版社印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 381 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5505-6/TQ·1980

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京朝工商广临字 (2004) 年第 007 号

编著者的话

从1845年第一台挤出机问世，历经一个半世纪的发展，挤出成型已成为聚合物加工最主要的成型和改性方法。挤出成型既是一种高效、连续、低成本、适应面宽的加工成型方法，同时又是一种低精密度、低附加值的成型加工方法。开发精密挤出成型技术和装备，满足各种精密制品的成型加工要求，使挤出成型成为一种高精密度、高附加值的加工方法是当前聚合物加工技术的研发热点之一。

近年来，我们在教育部骨干教师基金和北京市自然科学基金^①的资助下，对聚合物精密挤出成型机理和技术进行了较系统的理论和实验研究，取得了一些进展。本书以精密挤出成型为主线，分别介绍了与精密挤出成型技术相关的材料学和工艺学原理、数学模拟方法、精密挤出成型设备特点、精密挤出成型过程控制系统等内容，以及精密挤出成型技术的应用领域及发展前景。本书对从事聚合物挤出成型技术研究开发的人员有很好的参考价值，也可以作为高校聚合物加工专业研究生和本科生的教学参考书。

本书共分为7章，其中第1章、第5章由吴大鸣教授编著（其中第5章熔体泵部分由李庆春教授编著），第2章由刘颖副教授编著、第3章、第4章由李晓林副教授编著，第6章由许红博士编著（其中统计过程控制部分由韩国灿硕士编著），第7章由丁玉梅副教授编著。在本书的编著过程中，引用了李晓林博士、刘会举、操亚平、李亮、王建华、孙静、韩国灿和牟勇强等硕士的相关学位论文的部分内容，他们多年来系统的理论和实验研究工作的积累，为本书的编著奠定了良好的基础。杨淑芹老师在本书的打印排版工作中

^① 北京市自然科学基金资助项目：3022008

付出了辛勤的劳动。

在本书的编著过程中，我们力图对精密挤出成型所涉及的相关原理和技术进行系统地归纳和总结，努力反映精密挤出成型技术领域的最新进展，展示精密挤出技术诱人的应用前景。希望本书能够起到抛砖引玉的作用，唤起更多的业内学者和企业界有识之士对精密挤出技术的关注。但受编著者水平所限，本书中会存在一些错误，希望广大读者批评指正，不吝赐教。

编著者

2004年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 塑料挤出成型理论及技术的发展	2
1.1.1 挤出成型理论的发展	2
1.1.1.1 挤出过程数学模型的发展	2
1.1.1.2 挤出过程稳定性的研究	3
1.1.2 挤出成型技术的发展趋势	5
1.1.2.1 高速化	5
1.1.2.2 高效化	7
1.1.2.3 精密化	8
1.2 挤出过程的精密化与精密挤出	8
1.2.1 实现精密挤出的意义及其可能性	9
1.2.2 影响挤出制品精度的因素	10
1.2.3 实现挤出过程精密化的技术途径	12
1.3 精密挤出技术的应用前景	14
1.3.1 精密挤出成型将成为高附加值加工产业	14
1.3.2 用于精密反应挤出成型和功能梯度高分子材料的加工	15
参考文献	15
第 2 章 精密挤出成型的材料学基础	18
2.1 高聚物的黏弹性与挤出过程的波动	18
2.1.1 高聚物熔体的黏性流动	18
2.1.1.1 高聚物流体类型	18
2.1.1.2 高聚物熔体的剪切黏度	22
2.1.1.3 高聚物熔体剪切黏度与结构的关系	23
2.1.1.4 熔体剪切黏度对温度的敏感性	27
2.1.1.5 熔体剪切黏度对剪切速率的敏感性	32
2.1.1.6 熔体剪切黏度对压力的敏感性	39
2.1.2 高聚物熔体的弹性与法向应力差	40

2.1.2.1	法向应力差与相对分子质量和相对分子质量分布的关系	43
2.1.2.2	温度对法向应力的影响	44
2.1.2.3	剪切速率(应力)对法向应力的影响	44
2.1.2.4	挤出物胀大	46
2.1.2.5	出口压力	54
2.1.3	高聚物熔体的拉伸流动	57
2.1.3.1	拉伸应力及拉伸速率对拉伸黏度的影响	57
2.1.3.2	温度对拉伸黏度的影响	58
2.1.3.3	相对分子质量及其分布对拉伸黏度的影响	59
2.1.4	高聚物熔体的不稳定流动(熔体破裂)	59
2.1.4.1	熔体破裂的类型	60
2.1.4.2	低流率下的表面不稳定性(鲨鱼皮症)	63
2.1.4.3	周期性熔体破裂(壁面滑移)	70
2.1.4.4	总熔体破裂	79
2.1.4.5	不同聚合物的熔体破裂	84
2.1.5	高聚物的拉伸共振现象	85
2.2	高聚物的熔融稳定性	89
2.2.1	高聚物在挤出机中的熔融过程	90
2.2.2	高聚物分子运动的特点	91
2.2.3	影响非结晶高聚物熔融过程稳定性的因素	94
2.2.3.1	影响玻璃化温度 T_g 的因素	95
2.2.3.2	影响黏流温度 T_f 的因素	98
2.2.4	结晶高聚物的熔融过程分析	100
2.2.4.1	高聚物的结晶形态	100
2.2.4.2	高聚物的结晶度	101
2.2.4.3	影响结晶高聚物熔融稳定性的因素	102
2.3	高聚物的冷却固化与挤出制品的精度	106
2.3.1	高聚物的聚集态结构与分子运动的关系	106
2.3.2	非结晶高聚物的冷却固化过程	107
2.3.3	结晶高聚物的冷却固化过程	107
2.3.4	拉伸对高聚物结构性能的影响	110
	参考文献	111

第3章 精密挤出成型的工艺学基础	115
3.1 挤出过程的波动及其对成型制品精度的影响	115
3.1.1 波动类型	115
3.1.1.1 轴向波动及其对制品成型精度的影响	115
3.1.1.2 横向波动及其对制品成型精度的影响	116
3.1.2 波动的频率及其原因	116
3.1.2.1 高频波动	117
3.1.2.2 等频波动	117
3.1.2.3 中频波动	118
3.1.2.4 低频波动	119
3.1.2.5 随机波动	119
3.2 工艺参数波动对挤出稳定性的影响	119
3.2.1 温度波动对挤出稳定性的影响	119
3.2.2 压力波动对挤出稳定性的影响	121
3.2.3 螺杆转速波动对挤出稳定性的影响	124
3.2.4 螺杆几何参数对挤出稳定性的影响	127
3.2.5 机头流道几何参数对挤出稳定性的影响	129
3.2.5.1 高聚物在机头流道中流动速率分析	129
3.2.5.2 成型段长度	130
3.2.5.3 模头入口的几何形状	131
3.2.5.4 模头的阻流作用	133
3.2.5.5 挤出模头的流线型化	135
3.2.6 口模温度分布与挤出制品的横向精密度	137
3.2.7 固体输送及固体床破碎对挤出稳定性的影响	138
3.3 高聚物及其助剂对挤出稳定性的影响	141
3.3.1 高聚物的相对分子质量及其分布对挤出稳定性的影响	141
3.3.1.1 相对分子质量对挤出稳定性的影响	141
3.3.1.2 相对分子质量分布对挤出稳定性的影响	142
3.3.1.3 长链支化对挤出稳定性的影响	145
3.3.2 塑料助剂对挤出稳定性的影响	148
3.3.2.1 无机物填充高聚物的黏性和屈服点	148
3.3.2.2 填充高聚物的弹性	152
3.4 提高挤出过程稳定性的工艺措施	155

3.4.1	工艺参数的合理化	155
3.4.1.1	挤出机的工作压力	155
3.4.1.2	螺杆转速的确定	156
3.4.1.3	挤出温度的确定	156
3.4.2	工艺参数控制精度	157
3.4.2.1	温度控制	157
3.4.2.2	压力控制	158
3.4.2.3	螺杆转速控制	159
3.4.2.4	在线测试技术的应用	159
3.4.3	塑料配方合理化	160
3.4.3.1	改善加工性能	161
3.4.3.2	改善树脂的内在性能	161
3.4.3.3	降低成本	162
3.4.3.4	根据加工方法选择	163
3.4.3.5	助剂的来源与成本	163
3.4.3.6	制品的透明性	163
3.4.3.7	助剂的毒性	163
	参考文献	164
第4章	精密挤出过程的数学模型	166
4.1	固体输送段数学模型	166
4.1.1	料斗压力分布	166
4.1.2	固体床运动分析	168
4.1.3	固体床受力分析	170
4.1.4	固体床能量消耗	172
4.1.5	固体塞温度分布计算	174
4.2	压缩段数学模型	180
4.2.1	Tadmor 熔融理论的牛顿数学模型	181
4.2.1.1	基本假设	181
4.2.1.2	固相速度分布	182
4.2.1.3	固相温度分布	183
4.2.1.4	熔膜的速度方程和温度分布	183
4.2.1.5	固液相分界面上的热量平衡	184
4.2.1.6	熔膜的质量平衡	187

4.2.1.7	求解固相分布函数	188
4.2.2	对牛顿模型黏度的修正（考虑温度对黏度的影响）	192
4.2.3	非牛顿幂律模型（考虑剪切速率对黏度的影响）	194
4.2.4	非牛顿幂律模型（同时考虑温度和剪切速率对黏度的影响）	197
4.3	计量段数学模型	200
4.3.1	基本假设及基本方程	201
4.3.2	牛顿流体无限平行平板模型详解	202
4.3.2.1	速度场与流率计算	202
4.3.2.2	能耗计算	207
4.3.2.3	熔融段温度分布详解（牛顿模型）	209
4.3.3	非牛顿流体（幂律）无限平行平板模型详解	215
4.3.3.1	速度场与流率计算	215
4.3.3.2	能耗计算	219
4.3.4	考虑螺纹侧壁影响时对产量的修正	219
4.4	并联式稳压装置的数学模型	220
4.4.1	概述	220
4.4.2	稳压原理	221
4.4.3	稳压装置数学模型的建立	223
4.5	典型挤出流道中熔体流动的数学模型	231
4.5.1	渐缩狭缝口模的压力降模型	232
4.5.2	渐缩环形口模压力降模型	233
4.5.3	锥形口模压力降模型	233
4.5.4	高聚物在口模流道中不稳定流动的数学模型	235
	参考文献	239
第5章	精密挤出成型装备	242
5.1	精密挤出成型装备的特征	242
5.2	精密挤出机	243
5.2.1	精密挤出机的传动系统	244
5.2.2	精密挤出机的塑化系统	245
5.2.2.1	加料段的设计	247
5.2.2.2	螺杆的选择和设计	256
5.2.2.3	提高挤出机机筒的热惯性	269

5.2.3	精密挤出机的控温系统	270
5.2.4	精密挤出机的压力测量	273
5.3	提高挤出稳定性的装置	275
5.3.1	熔体泵	275
5.3.1.1	熔体泵的结构特点	275
5.3.1.2	熔体泵的计量、增压功能及工作原理	276
5.3.1.3	熔体泵的流量特性分析	278
5.3.1.4	熔体泵的主要技术参数及选择	285
5.3.1.5	熔体泵在塑料挤出中的应用	289
5.3.2	稳压装置	296
5.3.2.1	压力波动控制器	296
5.3.2.2	并联式稳压装置	297
5.3.2.3	节流式稳流装置	300
5.4	精密挤出机头	303
5.4.1	阻力可调节机头	304
5.4.2	口模间隙自动调节机头	305
5.4.3	组合式自动调节机头	305
5.4.4	熔体黏度调节式机头	306
5.4.5	降低熔体破裂的措施	306
5.5	精密挤出成型辅机	308
5.5.1	失重式计量加料装置	308
5.5.2	双驱动牵引装置	310
	参考文献	311
第6章	精密挤出成型设备的控制系统	315
6.1	挤出成型设备的控制系统	315
6.1.1	挤出成型装备的传统型控制系统（继电器、仪表控制型）	316
6.1.1.1	继电器控制系统的组成	316
6.1.1.2	仪表型控制系统	317
6.1.1.3	挤出成型装备的继电器、仪表控制型控制系统	317
6.1.2	以微型计算机控制器为控制核心的挤出成型设备控制系统	325
6.1.2.1	控制系统的组成	325
6.1.2.2	以计算机为控制核心的监控系统	326

6.1.2.3	以 PLC 为控制核心的控制系统	327
6.1.3	精密挤出成型设备控制系统的控制功能	333
6.1.3.1	影响挤出制品最终质量的因素	334
6.1.3.2	控制过程中的闭环反馈控制	335
6.1.3.3	挤出流量的几种测试和控制方法	341
6.1.4	国内外精密挤出设备	348
6.2	检测装置及设备	350
6.2.1	传感器	350
6.2.1.1	传感器的基本性能参数	351
6.2.1.2	传感器的几个性能指标	354
6.2.2	在精密挤出成型系统中所应用的传感器	355
6.2.2.1	温度传感器	355
6.2.2.2	力学传感器	359
6.2.2.3	转速传感器	365
6.2.2.4	管材外径(壁厚)测量仪	367
6.2.2.5	其它先进测量仪器	372
6.3	传动系统	376
6.3.1	挤出机传动系统相关参数	376
6.3.1.1	挤出机的功率、螺杆转速和转矩	376
6.3.1.2	挤出机的调速范围	377
6.3.1.3	挤出机的调速方法	377
6.3.2	直流调速系统	377
6.3.3	交流调速系统	379
6.3.3.1	三相异步电动机的转速控制	379
6.3.3.2	交流变频调速系统	379
6.3.4	伺服电动机	384
6.4	先进控制技术在精密挤出成型设备中的应用	385
6.4.1	先进控制系统涉及的软件技术和硬件技术	385
6.4.1.1	过程优化技术	385
6.4.1.2	实时监控软件平台	386
6.4.1.3	硬件技术	386
6.4.2	统计过程控制系统的应用	388
6.4.2.1	统计过程控制简介	388

6.4.2.2	控制图的原理与构造	389
6.4.2.3	生产过程实例分析	390
6.4.2.4	SPC 的发展趋势	396
6.4.3	先进在线测试技术	397
6.4.4	智能控制系统	398
6.4.5	基于 Internet 的在线设备诊断和控制技术	399
6.4.5.1	网络技术	399
6.4.5.2	Internet 基本构件	399
6.4.5.3	基于 Internet 的远程监控系统	400
6.4.5.4	网络技术在精密挤出成型系统中的应用	401
参考文献		405
第 7 章 精密挤出成型技术的应用		407
7.1	概述	407
7.2	精密挤出成型技术在管材生产中的应用	407
7.2.1	精密挤出管材机组的组成	407
7.2.2	精密挤出医用管材的应用前景	409
7.2.2.1	国外医用管材的应用现状	409
7.2.2.2	几种代表性医用管材的应用前景	411
7.2.3	精密挤出成型技术在普通塑料管材成型中的应用	418
7.3	精密挤出成型技术在薄膜、片材成型中的应用	422
7.3.1	精密挤出成型技术在薄膜成型中的应用	422
7.3.2	精密挤出技术在片材成型中的应用	423
7.4	精密挤出成型技术在光导纤维和高速电缆成型中的应用	425
7.4.1	精密挤出成型在光导纤维成型中的应用	425
7.4.2	精密挤出成型技术在电缆成型中的应用	428
7.5	精密挤出技术在自增强复合材料挤出成型中的应用	432
7.6	精密挤出成型技术在反应挤出中的应用	434
7.7	精密挤出成型技术的其它应用	434
7.7.1	取代其它成型方法制备高精度几何尺寸制品	434
7.7.2	精密挤出成型微发泡塑料制品	435
7.7.3	特种材料的成型加工	436
7.7.4	聚合物超分子结构的控制	437
参考文献		437

第 1 章 绪 论

世界上第一台柱塞式挤出机是由英格兰的 Henry Bewley 和 Richard Brooman 于 1845 年研制成功，而第一台单螺杆挤出机是由美国的 William Kiel 和 John Prior 于 1876 年研制成功的。历经一个半世纪的发展，挤出成型已成为高分子材料最主要的加工方法。据有关资料统计，有 60% 以上的塑料制品是经过挤出法加工而成的。

众所周知，挤出、注塑和中空吹塑是塑料成型加工的最主要方法。其中挤出成型是一种高效的成型加工方法，同时又是一种成型精度相对较低的方法。由于挤出成型是一个十分复杂的生产过程，在此过程中，高聚物要经历固体输送、熔融、混合、增压、泵送、成型、冷却固化等过程，并受到剪切、拉伸、压缩以及加热、冷却等作用，发生熔融、固化、取向、解取向、结晶等复杂的相态和结构变化，使得挤出过程的控制难度极大，制品成型的精度较低。制品几何精度较低造成的浪费是十分惊人的，采用常规挤出装备生产的板、片、膜、管的壁厚不均匀度一般可达 8%~10%，由此造成的材料浪费可达 8% 左右。按近年我国塑料制品的产量 21000kt 为基数，挤出成型制品的年产量 12600kt 计算，我国每年由于挤出制品的几何精度低就浪费掉 100 多万吨树脂^[1]。此外，挤出精度不高还限制了一些产品的应用领域，如以聚甲基丙烯酸甲酯为原料的光导纤维，设计上要求产品直径的公差不能超过其公称直径的 2%，常规挤出机是不能满足这一要求的；高速涂覆电缆、双向拉伸薄膜、医用特种管材制品以及微孔发泡制品等对挤出精密性要求极高，常规挤出工艺及设备也很难达到要求。

挤出过程的精密化是国内外挤出科学与工程的重要课题，也是挤出成型技术的重要发展方向。

1.1 塑料挤出成型理论及技术的发展

1.1.1 挤出成型理论的发展

挤出成型理论是精密挤出成型技术创新的基础，挤出成型过程数学模型的精密化可以为精密挤出成型机理的研究提供有力的工具。

1.1.1.1 挤出过程数学模型的发展

迄今，人们一般将挤出过程数学模型的发展分为三个阶段^[14]。

20 世纪 30~50 年代是塑料挤出工业发展的第一阶段，此时已开始用螺杆挤出机加工 LDPE、PVC、PS 等高分子材料。挤出理论的研究主要针对挤出机的熔体输送段，即一般我们所说的螺杆的计量段。此时的研究主要是建立润滑理论和在流体动力学的基础上，所采用的熔体本构模型是最简单的牛顿流体等温模型。最早致力于建立螺杆挤出数学理论研究的是 H. Rowell 和 D. Finlayson，他们在 1922 年对单螺杆挤出机计量段的流场、流率和能耗进行了计算，发表了挤出理论方面的经典性和开创性的论文^[2]。1959 年，Squires^[3]和 Schenkel^[4]发表了关于挤出过程数学模型研究的综述性文章；1962 年，J. Mckeley 等人对这段时期的研究成果进行了系统的总结，并出版了具有里程碑意义的专著《Polymer Processing》^[5]，奠定了挤出理论研究初期阶段的科学和工程基础。

20 世纪 50~70 年代是挤出理论发展的第二阶段。进入 20 世纪 50 年代后，塑料工业迅猛发展，塑料的产量几乎每隔 5 年翻一番。各种工程塑料也相继出现，比如 ABS、PP、POM、PC、PPO 等。此时的研究重点转移到了固体输送段和熔融段。熔体输送段的研究也由于电子计算机的出现而获得了很大的进展。Marshall 和 Klein 等借助于电子计算机对计量段的特性既在理论方面又在实验方面进行了详细深入的研究^[6]。1956 年，W. H. Darnell 和 E. A. J. Mol^[7]基于库仑摩擦机理提出了固体输送理论，这个模型直至今日仍获得很广泛的应用。1966 年，Western Electric 公司工程研究中心的 Z. Tadmor 教授在 B. H. Maddock^[8]和 L. F. Street^[9]

试验观察的基础之上，建立起了熔融过程的物理模型和数学模型^[10]。至此，螺杆挤出理论得到了系统化，虽然它并不完善，但人们已经可以定量分析单螺杆挤出过程塑料的输送、熔融、温度场、流率、压力等。

20 世纪 70 年代起，挤出理论进入了完善和成熟阶段。推动挤出模型进一步完善的原因主要得益于计算机的发展和计算方法的进步，特别是流体有限元技术的成熟，使得复杂模型的求解成为了可能。一些以前不能进行定量分析的重要因素，如漏流、螺杆根部的圆弧等对流场的影响，可以通过流体有限元方法得到数值解。在此阶段，H. Fukase^[11]、D. Rolyance^[12] 和 M. Hami^[13] 分别对固体床的加速和熔体输送段的流场进行了有限元计算。从 20 世纪 70 年代末起，北京化工大学朱复华教授^[14] 将可视化技术引入单、双螺杆挤出模型的研究，提出了非塞流固体输送模型、三段七区挤出模型等；北京化工大学耿孝正教授^[15] 在双螺杆几何学和混炼机理方面进行了系统的研究；20 世纪 90 年代中期华南理工大学瞿金平教授^[16] 将电磁振动引入挤出系统，提出了相应的数学模型。

1. 1. 1. 2 挤出过程稳定性的研究

挤出过程的压力波动、温度波动会引起挤出产量的波动，影响到制品的几何精度和性能的均匀性。H. B. Kessler 等^[17] 在 1960 年发表的论文，报道了他们关于压力波动和温度波动对挤出流率波动影响的研究结果。他们将挤出过程的波动分为高频波动、中频波动和低频波动，并且认为每分钟 1~15 次的中频波动是挤出参数对固体输送不稳定和熔融不稳定的响应。Z. Tadmor 等人^[18] 实验证实了中频波动的重要原因，是挤出过程中固相塑料瞬时堵塞螺槽通道，熔融料流暂时中断所产生的。1984 年，J. Lindt 等人^[19] 的研究开始涉及到熔融模型中的固体床加速和环流是否存在等问题。T. H. Sun^[20] 认为挤出机加料段建立的压力与挤出稳定性紧密相联，粒料的密度压缩率会增加该压力，这就是低松密度物料会产生挤出波动的原因。Y. Guo^[21] 发现熔融温度 T_m 对制品质量有明显影响，并通过分析挤出机的总能量平衡建立了预示 T_m 的简单方程。近年

来，北京化工大学的刘会举^[22]、操亚平^[23]、李晓林^[24]等完成了单螺杆精密挤出机理方面的硕士和博士论文，对影响挤出过程稳定性的工艺和装备原因以及提高挤出过程稳定性的因素进行研究。

还存在另外一类不稳定流动现象：在挤出口模出口处出现的挤出胀大和挤出物熔体破裂现象，这是一种在挤出机头流道中和出口区域出现的不稳定流动现象，这种不稳定流动会造成挤出制品表面质量下降及几何尺寸和形状的波动。一般认为，此类流动不稳定性可以粗略地划分为^[25]：①挤出口模出口处发生的表面不稳定性现象，如鲨鱼皮和滑-黏现象；②由于口模入口流动不稳定性所引发的整体性熔体破裂现象，这与材料具有较长的松弛时间，即熔体的弹性有关^[26,27]。对于具有较窄的相对分子质量分布的乙烯- α 烯烃共聚物来说，口模出口处的表面不稳定性是主要问题。尽管以实验结果为基础的表面不稳定性的机理研究开展了很长时间，但对一些有争议的问题仍然在讨论中。Cogswell^[28]根据光学和显微^[29~32]分析，以及数值模拟^[33,34]的结果，提出鲨鱼皮是聚合物熔体在邻近口模出口区域受到较大拉伸应力而引发的熔体破裂现象。实验还证实，聚合物的拉伸流变性能，如熔体强度和应力硬化行为，将会对鲨鱼皮的出现产生影响^[31,35]。Gogos 等^[36]根据上述机理提出了避免或降低鲨鱼皮现象的可能方法。另外一个众所周知的鲨鱼皮形成机理，是将鲨鱼皮现象解释为聚合物熔体与口模壁面产生了滑移，即黏附失效解释^[37~40]。由于高黏度聚合物熔体能够在口模壁面产生滑移的说法得到了广泛的认同^[41]，所以在一些场合，滑移可能是表面不稳定性，尤其是滑-黏失效产生的原因。Genies^[42]提出了表面不稳定性的分子理论，认为表面不稳定性的原因在于主体聚合物的分子链段与黏附在口模壁面的聚合物分子链段的解缠，即黏附失效解释。迄今，除了 Brochard 和 Genies 提出的理论^[42]，以及基于这些理论的实验研究结果以外^[43,44]，关于分子链段的缠结耦合作用对聚合物熔体流变性能的影响问题还没有更多的讨论^[30,45]。王十庆^[46]对振荡（或喷射）流动行为、鲨鱼皮表面粗糙（熔体破裂）、挤出物畸变、流动不连续性以及界面滑壁在内的一系列最突

出的毛细管流动现象的基本物理问题进行了细致的研究，揭示了喷射流动及振荡流动、鲨鱼皮、流动不连续性及滑壁均产生于熔体/壁界面相互作用的极度变化。吴舜英等^[47]运用分子活化率理论和内聚能的概念提出了两种临界应力的计算式，还建立了滑移过程的数学模型，用以分析速度、压力等工艺参数对滑移过程的影响。Masayuki Yamaguchi^[48]等研究了乙烯- α 烯烃共聚物的毛细管挤出过程表面不稳定性。他们的实验发现：乙烯/1-己烯共聚物（EHR）的鲨鱼皮初始应力随着 1-己烯含量的增加迅速降低，而乙烯/丙烯共聚物（EPR）的鲨鱼皮起始应力在实验范围内与丙烯的含量无关。其次，高 1-己烯含量的 EHR 与 EPR 相比，在较低应力下就呈现出鲨鱼皮现象。较低的类橡胶平台模量导致了低应力下的高 Deborah 数，成为了较低的鲨鱼皮起始应力的原因。再者，较低的缠结密度会引起聚合物熔体在较低的应力水平下发生类似于玻璃态聚合物一样的破裂现象，也是鲨鱼皮起始应力较低的原因。李亮^[49]在已有的挤出胀大过程数学模型基础上，定量分析了因工艺参数波动引起的挤出胀大率波动对制品几何稳定性的影响，以及口模横向（或环向）温度不均匀对制品壁厚均匀度的影响。李晓林^[24]采用黏弹本构方程对聚合物在挤出流道中的不稳定流动进行了数学模拟，该模型为定量确定挤出流道的最小长度提供了方法。

1.1.2 挤出成型技术的发展趋势^[50]

挤出成型技术和装备正朝着高速化、高效化和精密化的方向发展。

1.1.2.1 高速化

高速化的目的就是在保证塑化质量和成型质量的前提下，不断提高单机产量。高速化代表着塑料成型装备发展的重要方向，也是衡量塑料成型装备技术水平的最重要指标。

塑化能力和成型技术水平都会制约单机产量的提高，表 1-1 给出了单螺杆挤出机高速化进程^[3]。