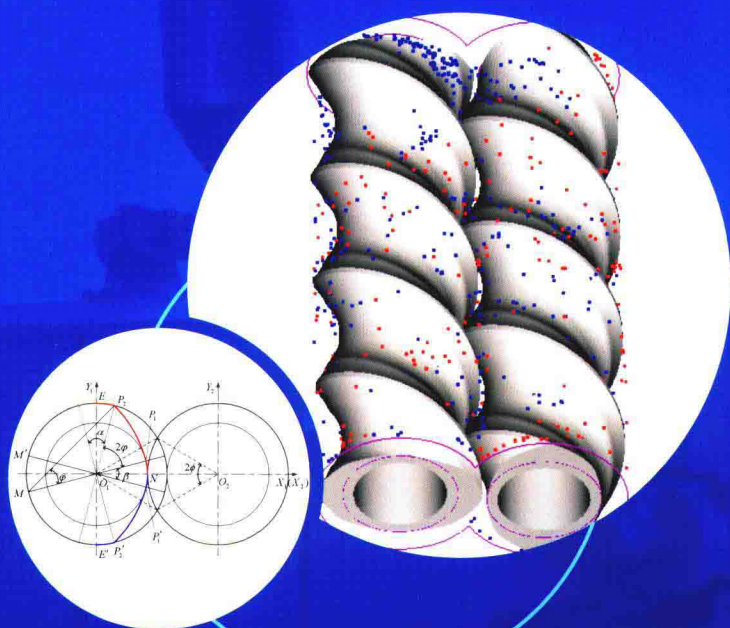


双螺杆捏合机 螺纹元件型线设计

理论与方法

Design Theory and Method of Profile
of Screw Element for Twin-screw Kneader

魏 静 张光辉 / 编著



科学出版社

双螺杆捏合机螺纹元件型线 设计理论与方法

魏 静 张光辉 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍双螺杆捏合挤出设备的功能、分类,发展现状与趋势,以及螺纹元件设计过程中存在的关键技术难题;给出啮合型双螺杆螺纹元件端面型线设计理论与方法,为后续螺纹元件端面型线的演化设计及性能分析提供理论基础;然后介绍基于相对运动法、包络法以及基于泛函分析思想的啮合同向/异向双螺杆螺纹元件端面型线设计与演化方法;接着对双螺杆捏合挤出设备流场特性与混合性能进行数值模拟,分析不同螺杆组的混合性能差异;最后给出设计参数对差速双螺杆捏合挤出设备混合性能与力学性能的影响。

本书可供化工机械专业、机械工程专业的高年级本科生、研究生,以及科研、设计专业技术人员参考,还可对螺杆压缩机、螺杆泵等以螺杆转子为工作元件的转子类型线设计人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

双螺杆捏合机螺纹元件型线设计理论与方法 / 魏静, 张光辉编著. — 北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057305-6

I. ①双… II. ①魏… ②张… III. ①螺杆挤压机-机械元件-机械设计 IV. ①TQ330.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 086237 号

责任编辑: 张 展 刘莉莉 / 责任校对: 陈 杰

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100017

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印制

科学出版社发行 各地新华书店经销

www.lib.ahu.edu.cn

2018年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2018年6月第一次印刷 印张: 14.25

字数: 280千字

定价: 98.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

螺杆转子是压缩机、转子泵、捏合机等螺杆设备的核心部件，是通过端面型线绕螺旋线运动而形成的，其性能好坏往往受到端面型线设计优劣的影响，因此对转子端面型线展开研究格外重要。双螺杆捏合挤出设备螺纹元件的型线直接决定了捏合机的输送、剪切、混合、塑化等性能，其型线设计必须遵循啮合原理，以防止两根螺杆在空间位置上的干涉，故设计限制多、难度大。对常规螺纹元件几何学的研究，多年来常用的方法是將一根螺杆螺顶一点的相对运动轨迹作为另一根螺杆的螺腹曲线，并以此确定螺杆端面型线。螺杆转子元件的设计从根本上说是转子端面型线的设计，而转子端面型线设计仍停留在根据相对运动原理设计的阶段，并且根据相对运动原理形成的螺纹转子元件，具有单一固定的端面型线，从根本上制约了啮合型和部分啮合型新型螺纹元件的设计，远远不能满足快速发展的聚合物工业对新型性能优良的同向双螺杆捏合机的需求，这就要求在常规螺纹端面型线设计的理论基础上找寻一种新的设计方法，而这种设计方法不仅可以引入新的螺纹端面组成齿曲线，还能探寻各种类型端面型线之间存在的内在规律。

自2005年3月跟随张光辉教授在重庆大学机械传动国家重点实验室攻读博士学位以来，至今已有13年的时间。机械传动国家重点实验室是国家在机械传动及其相关领域建立的应用基础研究和高层次人才培养基地，主流研究方向是包括齿轮在内的机械传动领域，导师张光辉教授也是国际上从事蜗杆传动研究的知名专家。螺纹元件端面型线设计似乎离齿轮传动这个主流研究方向很远，但机缘巧合，有一家公司认为这种设备的螺纹元件端面型线设计和齿轮传动有点类似，咨询作者能否研究研究，自此开始了双螺杆捏合挤出设备螺纹元件端面型线设计与制造技术的研究，博士论文也是针对一种差速型双螺杆捏合机的螺纹元件端面型线设计与制造开展的。博士毕业后，作者离开重庆大学到大连理工大学机械工程学院工作了6年，于2014年底重新回到了重庆大学。工作期间，获得了包括国家自然科学基金、博士后基金等项目资助，与自己的几个研究生一起持续对其进行研究。随着研究的深入，发现该研究领域与化工机械专业结合更紧密，要想进一步突破并实现工业化应用需要跨专业、跨领域。由于博士毕业后一直还在齿轮传动领域开展研究工作，深感精力有限，但直接放弃这么多年的研究工作又有些许不舍，于是萌生了把前期研究工作进行归纳总结、整理成书出版的想法，期望把其中的

一些设计思想,尤其是端面型线的“演化”与“泛函”设计思想和大家一起分享。

本书中的内容主要包括作者博士期间开展的一些工作,以及后期开展的双螺杆捏合挤出设备螺纹元件端面型线设计理论与方法的研究成果,还包括了自2014年回到重庆大学以后尚未公开发表的一些最新研究成果。期望本书对完善双螺杆捏合挤出设备螺纹元件的型线设计基础理论、综合性能的提升,尤其是螺纹元件型线设计中的“演化”与“泛函”思想的应用,以及对螺杆压缩机、螺杆泵等依靠螺杆转子为工作原理的机械设计理论的发展能起到一定的推动作用。如果书中内容能为读者带来一定的启发,并为读者的工作带来一定的帮助,那将是编者的最大心愿。

全书共分7章,每一章均为作者前期的科研成果以及研究实例。第1章绪论;第2章啮合型双螺杆螺纹元件端面型线设计理论与方法;第3章啮合同向双螺杆螺纹元件端面型线设计与演化;第4章啮合异向双螺杆螺纹元件端面型线设计与演化;第5章啮合同向螺纹元件流场特性与混合性能数值模拟;第6章啮合异向螺纹元件流场特性与混合性能数值模拟;第7章设计参数对啮合异向差速螺纹元件混合与力学性能影响。

本书由重庆大学作者与张光辉教授共同撰写完成。书中的部分内容来源于课题组的硕士研究生孙旭建、梁新龙、陈大兵、周东明等同学的硕士论文,在此一并感谢。

本书得到了国家自然科学基金(No.50905023, No.51275553)、中国博士后科学基金资助面上项目(20100471443)、中国博士后科学基金特别资助(201104597)等项目的支持。最后,诚挚地感谢科学出版社给予本书的编辑出版。

本书从策划到编写完成历时三年,中间多次调整内容和章节,由于作者水平有限,书中欠妥之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

魏 静

2018年3月于重庆大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 捏合机的分类与基本结构	1
1.2.1 捏合机的分类	1
1.2.2 捏合挤出设备的基本结构	5
1.2.3 双螺杆捏合挤出设备的基本功能	7
1.3 双螺杆捏合挤出设备的发展现状与趋势	10
1.3.1 双螺杆捏合挤出设备的研究现状及发展趋势	10
1.3.2 双螺杆捏合挤出设备综合性能要求	11
1.3.3 双螺杆捏合挤出设备螺纹元件型线设计理论与方法	13
1.4 双螺杆捏合挤出设备螺纹元件设计存在的关键技术难题	15
1.5 本书主要内容	16
参考文献	17
第2章 啮合型双螺杆螺纹元件端面型线设计理论与方法	22
2.1 概述	22
2.2 啮合型双螺杆螺纹元件端面型线设计的相对运动法	22
2.2.1 常规啮合型同向双螺杆转子的运动学原理	22
2.2.2 常规啮合型同向双螺杆转子中心距与螺顶角的关系	28
2.2.3 同向双螺杆端面型线的求解	30
2.2.4 常规啮合型异向双螺杆啮合几何学	34
2.3 啮合型双螺杆螺纹元件端面型线设计的包络法	37
2.3.1 坐标系建立与变换	38
2.3.2 端面型线及其共轭曲线	40
2.3.3 基于包络法的端面型线及其共轭曲线求解	42
2.4 啮合型双螺杆螺纹元件的几何特性	43
2.4.1 长径比	43
2.4.2 泄漏三角形	44
2.4.3 螺纹元件轴向截形	45
2.4.4 螺纹元件理论啮合线	46

2.4.5	螺纹元件理论接触线长度	46
2.4.6	端面面积、齿槽容积及端面利用系数	46
	参考文献	49
第3章	啮合同向双螺杆螺纹元件端面型线设计与演化	51
3.1	概述	51
3.2	基于相对运动法的啮合同向双螺杆端面型线设计与演化	54
3.2.1	等速同向螺纹元件端面型线设计	54
3.2.2	差速同向双螺杆端面型线设计	58
3.3	基于包络法的双螺杆螺纹元件圆弧端面型线设计与演化	61
3.3.1	组成齿曲线为圆弧的端面型线设计	61
3.3.2	组成齿圆弧线的啮合特性	64
3.3.3	组成齿全部为圆弧的端面型线形成方法	65
3.3.4	圆弧端面型线的演化	67
3.4	基于泛函分析思想的同向双螺杆螺纹元件型线设计与演化	77
3.4.1	基于泛函分析思想的同向双螺杆螺纹元件型线设计	77
3.4.2	同向双螺杆螺纹元件型线泛函设计实例	79
3.4.3	由通用型线泛函表征的同向双螺杆螺纹元件型线演化	85
	参考文献	86
第4章	啮合异向双螺杆螺纹元件端面型线设计与演化	88
4.1	概述	88
4.2	啮合异向双螺杆螺纹元件端面型线的数学模型	91
4.2.1	异向双螺杆转向的确定	91
4.2.2	基于相对运动法的常规异向双螺杆螺纹元件端面型线设计	92
4.2.3	基于包络法的异向双螺杆螺纹元件端面型线设计	96
4.3	异向双螺杆螺纹元件端面型线演化设计	100
4.3.1	端面型线演化一	101
4.3.2	端面型线演化二	102
4.3.3	端面型线演化三	103
4.3.4	端面型线演化四	105
4.3.5	端面型线演化五	107
4.4	异向双螺杆螺纹元件端面型线优化设计	109
4.4.1	设计变量、目标函数及约束条件	109
4.4.2	设计参数对面积利用系数的影响	111
4.4.3	考虑输送性能的设计参数分析	113
4.4.4	考虑剪切性能的设计参数分析	115
4.4.5	优化后的异向双螺杆端面型线	116

4.4.6 异向双螺杆螺纹元件端面型线优化设计结果	119
4.4.7 优化后的双螺杆螺纹元件几何特性	120
参考文献	128
第5章 啮合同向螺纹元件流场特性与混合性能数值模拟	129
5.1 概述	129
5.2 模型建立和边界条件设定	130
5.2.1 流场模拟与混合性能的数值计算方法	130
5.2.2 数学模型建立和边界条件设定	132
5.3 拟稳态流场统计学分析及应用参数	134
5.3.1 拟稳态流场统计学分析的示踪粒子法 (PTA)	134
5.3.2 分析过程应用的参数表征	134
5.4 典型啮合同向螺杆组的流场数值模拟与混合性能	136
5.4.1 物理模型和有限元模型	136
5.4.2 流场数值模拟	138
5.4.3 分布混合性能评估	142
5.4.4 分散混合性能评估	146
5.5 典型啮合同向双螺杆捏合挤出设备螺纹元件设计与组合	149
5.5.1 工程塑料造粒机	149
5.5.2 片材双螺杆挤出机	152
参考文献	154
第6章 啮合异向螺纹元件流场特性与混合性能数值模拟	156
6.1 概述	156
6.2 物理模型和有限元模型	156
6.3 常规啮合异向等速双螺杆螺纹元件	159
6.3.1 流场分析结果	159
6.3.2 分布混合性能评估	165
6.3.3 分散混合性能评估	168
6.4 啮合异向差速双螺杆螺纹元件(单头右螺杆)	171
6.4.1 流场分析结果	171
6.4.2 分布混合性能评估	177
6.4.3 分散混合性能评估	180
6.5 啮合异向差速双螺杆螺纹元件(双头右螺杆)	182
6.5.1 分布混合性能评估	182
6.5.2 分散混合性能评估	185
6.6 不同啮合异向双螺杆螺纹元件混合性能对比	187
参考文献	190

第 7 章 设计参数对啮合异向差速螺纹元件混合与力学性能影响	192
7.1 概述	192
7.2 含顶角参数的啮合异向差速双螺杆螺纹元件型线方程	192
7.3 头数比为 4 : 1 的双螺杆螺纹元件几何模型及有限元模型	196
7.4 螺杆顶角对啮合异向差速螺纹元件混合性能影响	197
7.4.1 粒子空间流动规律	197
7.4.2 粒子轨迹分析	198
7.4.3 分布性混合性能评估	199
7.4.4 分散混合性能评估	201
7.5 螺杆顶隙对啮合异向差速螺纹元件混合性能影响	203
7.6 设计参数对螺纹元件力学性能的影响	208
7.6.1 螺纹元件力学分析的数学模型	208
7.6.2 流体对螺杆转子作用力及其结果分析	213
参考文献	218

第1章 绪 论

1.1 概 述

捏合机广泛应用于化工、橡胶、塑料、制药、食品等工业中，是一种高性能的、对高黏度及超高黏度的物质进行混合、搅拌及塑化等操作的机械设备。尤其是近 30 年来随着高分子工业飞速发展，作为生产高分子材料的核心设备的聚合反应器中有 85% 以上是搅拌设备。研究开发高效的聚合反应器对捏合搅拌设备的发展将产生强大的推动力。对于聚合反应器来说，不仅需要良好的混合性能，还需要对被加工物料提供足够大的剪切性能。一些大型的包括石化部门的企业集团，如日本的住友重机和三菱重工等便从开发新型、高效聚合反应器的角度出发，开发出了叶片式、叶片组合式等叶轮式聚合物加工反应器。这些聚合物加工反应器从综合性能上看，较全面地考虑了混合、剪切等性能。

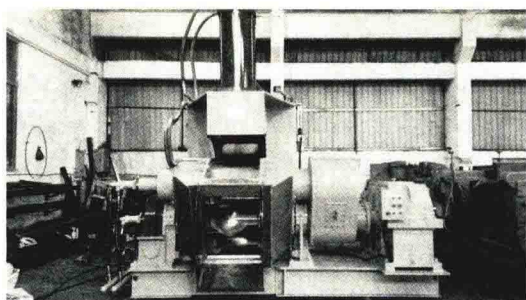
另外，现代高分子材料领域的进步促进了高黏度流体搅拌捏合设备的进一步发展。一方面是高分子材料的反应加工和高分子合金的兴起，使高分子材料高性能化和低价格化。另一方面是耐热型工程塑料以及超强力、高弹性工程塑料(如超高分子量聚乙烯、液晶聚合物)等高性能、高价格的聚合物的出现。这是因为在生产这些复合材料或高性能材料时，都需要在较短时间内使黏度为 $10^6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ 的超高黏度流体彼此混炼；或者是使超高黏度流体与低黏度流体相混炼，而且有些高性能聚合物必须在 400°C 高温和高真空下处理超高黏度流体才能完成加工。

1.2 捏合机的分类与基本结构

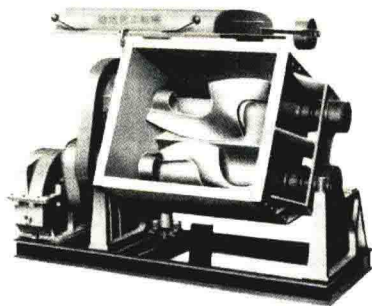
1.2.1 捏合机的分类

捏合操作处理的物料黏度一般都大于 $10^5 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ，且大多属于非牛顿流体，流动性很小。物料在捏合过程中存在分布混合和分散混合等现象，分布混合仅使参与混合的物料发生空间位置的改变，无颗粒直径的改变；分散混合则会使物料的颗粒直径发生变化。在实际的捏合过程中，往往伴随着这两种混合作用同时发

生。通常，以分布混合为主并且无相变产生的捏合机械称为混合设备，如转鼓式混合机、罗带混合机、犁刀式混合机等；以分散混合为主的捏合机械称为混炼设备，其特点是物料多次重复通过高剪切区，受到强剪切作用，如橡胶塑料行业所用的开炼机、密炼机和挤出机等。捏合机根据工作状况可以分为间歇式捏合机和连续式捏合机。间歇式捏合机一般分为低速捏合机、高速捏合机。低速捏合机有犁状转子混合机和 Z 形捏合机，如图 1.1 所示。高速捏合机主要由混合锅、叶轮、折流板、压盖、排料装置、传动装置和加热冷却装置等组成。



(a)犁状转子混合机



(b)Z 字形捏合机及其捏合元件

图 1.1 低速捏合机

连续捏合设备有多种，如管道捏合机、单螺杆捏合挤出设备(图 1.2)、同向双螺杆捏合挤出设备(图 1.3)、异向双螺杆捏合挤出设备(图 1.4)以及多螺杆捏合挤出设备(图 1.5)等。作为一种高性能的聚合物加工设备，捏合机根据工况还可分为两类：第一类为间歇式，如密炼机、开炼机等(图 1.1)；第二类为连续型螺杆捏合机(图 1.3~图 1.5)。

按两螺杆的旋转方向分，可分为同向旋转和异向旋转双螺杆捏合挤出设备。前者旋转方向相同，后者旋转方向相反。按两螺杆轴线相交还是平行分，若两螺杆轴线平行，叫作平行双螺杆挤出设备，也叫作圆柱形双螺杆挤出设备；若

两螺杆的轴线相交，叫作锥形双螺杆挤出设备。常用的双螺杆挤出机既有啮合的，也有非啮合的，有异向旋转的，也有同向旋转的，有平行双螺杆，也有锥形双螺杆(图 1.6)。



图 1.2 单螺杆捏合挤出设备及其元件

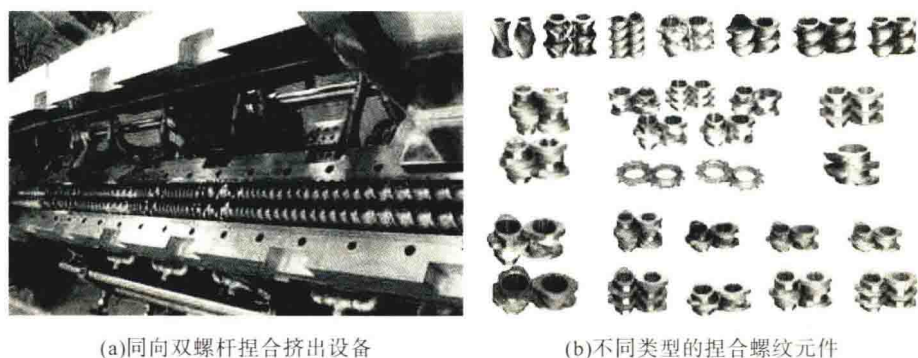


图 1.3 同向双螺杆捏合挤出设备及其元件

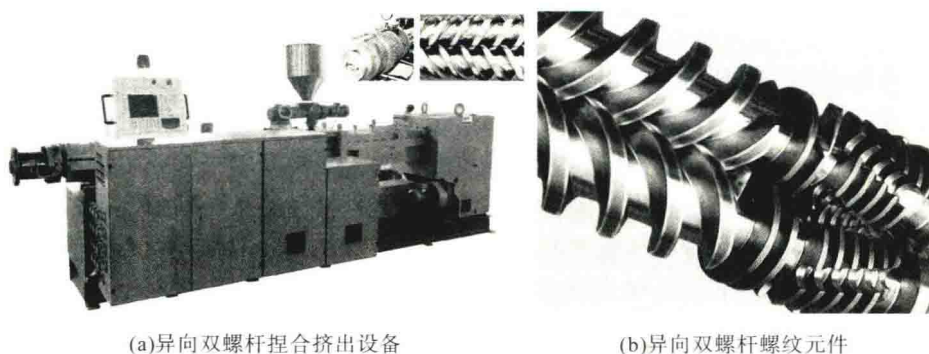
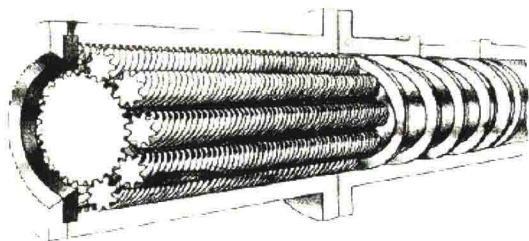


图 1.4 异向双螺杆捏合挤出设备及其元件

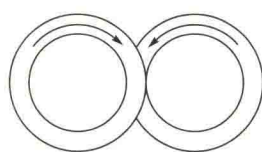


(a)三螺杆捏合挤出设备

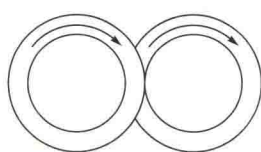


(b)星型螺杆捏合挤出设备

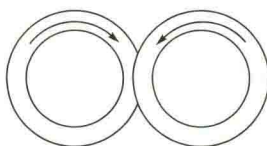
图 1.5 多螺杆捏合挤出设备



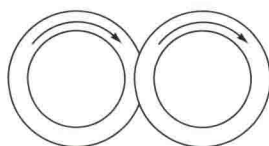
(a)异向旋转, 全啮合



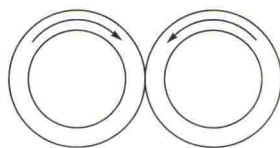
(b)同向旋转, 全啮合



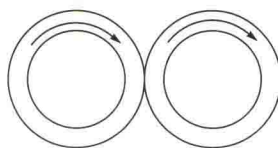
(c)异向旋转, 部分啮合



(d)同向旋转, 部分啮合



(e)异向旋转, 非啮合(相切)



(f)同向旋转, 非啮合(相切)

图 1.6 双螺杆捏合挤出设备分类

各种连续型螺杆捏合挤出设备的关系及分类如图 1.7 所示。

双螺杆捏合挤出设备作为捏合机的一种, 具有良好的输送、混合、塑化、剪切作用, 在化学工业、食品医药等领域应用广泛。随着高聚物工业的快速发展, 双螺杆捏合挤出设备逐步成为生产制备各种聚合物材料的重要机械设备之一^[1]。

20 世纪 30 年代中期于意大利, 用于塑料工业的首台双螺杆捏合挤出设备被研制出来, 截至现在已有 80 年的时间, 该段时间内双螺杆捏合挤出设备的使用逐渐增多, 机械设计加工技术有了良好的发展, 但是在实际应用中遇到了许多单螺杆捏合挤出设备难以解决的问题, 且多螺杆捏合挤出设备的应用尚少。据统计, 在工业技术发达国家, 双螺杆捏合挤出设备被广泛应用于异型材和板材等的加工

中，并且管材加工和造粒过程中几乎全部使用双螺杆捏合挤出设备^[2]。一些大型的石油化工集团还研制了许多具有专门用途的高聚物加工反应器以满足自身需求。当前在工业技术不断发展的条件下，人们对于高性能高品质聚合物制品的需求越来越多，同时聚合物制品的生产工艺和加工条件也变得更加复杂，并且为了保证产品质量就需要准确的计量方式、合理的加料方式、良好的加热冷却方法、先进的控制系统等，这些高聚物工业所面临的高要求有效地促进了捏合设备尤其是双螺杆捏合设备的高速发展。

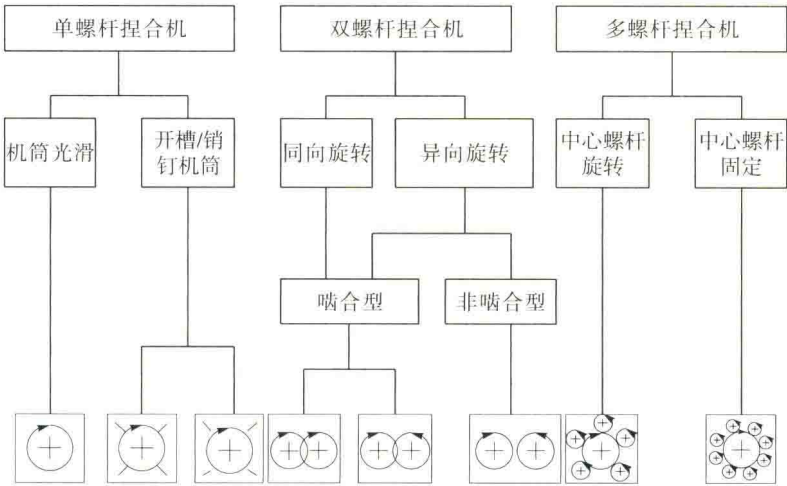


图 1.7 连续型螺杆捏合挤出设备分类

1.2.2 捏合挤出设备的基本结构

双螺杆捏合机的发展是随着食品医药工业、聚合物成型加工工业等的发展而不断进步的。早在 1869 年双螺杆捏合机就已经开始用于食品的加工，而自 19 世纪 30 年代在意大利诞生首台用于聚合物成型加工的双螺杆捏合机以来，也已有约 80 年的发展历程。长期以来啮合型双螺杆捏合机是工程师们研究的主要对象之一，早在 20 世纪 20 年代，异向双螺杆捏合机在低黏度油液的输送方面已经展现出重要的商业应用价值；20 世纪 30~40 年代，异向双螺杆捏合机才开始逐渐应用到聚合物的加工中；20 世纪 50 年代，异向双螺杆捏合机开始应用到聚氯乙烯型材的挤出加工中，而当前异向双螺杆捏合机的发展也正是得益于聚氯乙烯产品的发展；20 世纪 60 年代，德国莱斯特瑞兹(Leistritz)公司研制出一种模块化的啮合异向型双螺杆捏合机用于物料的混合；20 世纪 70 年代，日本制钢所也研制出了设计和目的与莱斯特瑞兹公司不同的模块化异向双螺杆捏合机。确切而言，20

世纪 60 年代晚期和 70 年代早期异向双螺杆捏合机逐步发展起来, 并得到广泛应用^[3, 4]。

双螺杆捏合机在结构上有很多形式, 按照常规划分方法可将双螺杆捏合机归纳为四类: 平行和锥形、非啮合/啮合型、啮合区螺槽开放/封闭型、同向/异向旋转型双螺杆捏合机^[3]。一般常见的双螺杆捏合机包含动力与传动系统、螺杆挤压混炼系统、控制系统、加热冷却系统等。图 1.8 所示为双螺杆捏合机的结构示意图, 电机 12 通过联轴器 11、功率分配齿轮箱 10 将动力传递给螺杆转子 5, 功率分配齿轮箱 10 的输出轴转速比与螺杆转子的头数呈反比, 并通过联轴器 9 与螺杆转子联接, 从而实现螺杆转子的旋转, 螺杆转子 5 组装放置在机筒 2 内, 机筒 2 上开有排气口 4, 通过加热冷却装置 3 控制温度, 从加料装置 7 中加入所要加工物料, 物料经输送、熔融后由固态变为熔融状态, 经过剪切混合最终由机头 1 挤出成型。

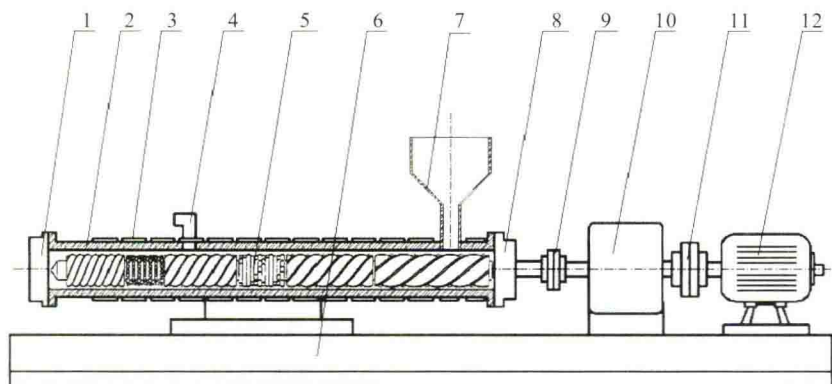


图 1.8 双螺杆捏合机的结构示意图

1-机头；2-机筒；3-加热冷却装置；4-排气口；5-螺杆转子；6-机架；7-加料装置；

8-端盖；9-联轴器；10-功率分配齿轮箱；11-电机联轴器；12-电机

双螺杆捏合挤出设备发展至今已涌现出众多有名的生产商, 国外生产商如: 德国的贝尔斯托夫(Berstorff)、科贝隆(Coperion)、布拉本德(Brabender)、巴顿菲尔(Battenfeld)、莱斯特瑞兹(Leistritz), 日本的三菱重工、东芝机械、制钢所, 美国贝克珀金斯(Baker Perkins)公司等。国内比较知名的有中装科技、瑞亚、青岛隆诚等双螺杆捏合机制造厂家。随着双螺杆捏合机的广泛应用和快速发展, 传统双螺杆捏合机的不足被逐渐改善, 各种新型高性能的双螺杆捏合机不断涌现出来。贝尔斯托夫研制出的 ZEUTX 系列双螺杆捏合机, 螺杆转子直径和生产效率比良好, 具有高达 1200 r/min 的设计转速, 并且转子扭矩大、产能高; Thermo 公司研制出 PRISM TSE 24MC 型双螺杆捏合设备, 该机型安装简单, 且具有小型连续处

理能力；扬州远发化工机械有限公司研发的 ZS-35A 双螺杆试验捏合机，转子长径比为 22，比原热固性粉末涂料设备长径比增加了 28%；其他类型的捏合机械还有如 Baker Perkins 公司的 MP 捏合机，LIST 公司的 LIST 捏合机，日本东芝机械公司制造的 TEM-136BS 型捏合机，三菱重工开发的新型 HVR 和 SCR 型双螺杆捏合机^[5]，北京福田建材机械有限责任公司生产的 SJZ35/80、SJZ60/130、SIZ80/172 等系列的捏合机。同时各种新型的螺杆元件也不断被研发出来，如能够有效促进分布混合的螺杆混合元件 SME (screw mixing element)、TKD 元件，贝尔斯托夫公司生产的 MR、ML、MPE 混合元件、GFM 元件、S 型元件、六棱柱元件等^[6-10]。新型双螺杆捏合挤出设备和新型螺纹元件的不断出现，对高聚物工业的发展具有重要意义。

1.2.3 双螺杆捏合挤出设备的基本功能

第一台用于塑料加工的双螺杆挤出机于 1935 年在意大利诞生以来，距今已有 80 余年时间。在这段历程中，随着现代塑料加工提出越来越多的单螺杆挤出机难以满足的要求，以及螺杆结构设计、应用基础研究和一些关键技术不断进步和完善，双螺杆捏合挤出设备得到越来越广泛的应用。据统计，在发达工业国家，板材、异型材、片材、发泡材加工中双螺杆捏合挤出设备占有统治地位，而在其管材加工和造粒上几乎全部使用双螺杆捏合挤出设备。

双螺杆挤出机按两根螺杆啮合与否分类，可分成全啮合型、部分啮合型和非啮合型。前者的两根螺杆的螺棱各自不同程度地插入对方的螺槽，后者则近似两根单螺杆的并列，各自的螺棱游离于对方的螺槽。其中后两种类型受干涉问题的限制小，设计自由度大。而全啮合型双螺杆必须遵循啮合原理，以防止两根螺杆在空间位置上的干涉，故设计限制多、难度大。在挤出机理上，前者远比单螺杆复杂，应用较广；后者却近似于单螺杆挤出机，应用较少。按螺杆的旋向可分为自润滑同向旋转双螺杆挤出机(SWCOR)和紧密内啮合异向旋转双螺杆挤出机(CICTR)。

双螺杆挤出机的工作特性主要表现在输送作用、混合作用、自清理作用、剪切及辊压作用等几个方面。

1. 输送作用

啮合型双螺杆与单螺杆之间的主要区别之一就是它们的输送机理不同。对单螺杆而言，其固体输送靠的是物料与机筒和螺杆的摩擦力的差值，熔体输送则凭它们之间的黏滞力，因此单螺杆输送机理取决于加工对象的固态摩擦性质和熔融态黏性性质。这种输送机理不仅效率低、能耗大，而且易出现不稳定现象。因为上述摩擦特性受诸多因素如温度、压力、速度、螺杆及机筒表面粗糙度、物料固

态形状等影响^[11, 12]。啮合型双螺杆具有不同程度的强制输送特性, 这种输送行为类似于双螺杆泵, 因此工程上也常将异向双螺杆的输送能力称为泵送能力^[13]。

强制输送作用在几个方面改善了工作性能。第一, 它减少了输送机理对物料与螺杆及机筒间的摩擦性质的依赖, 提高了输送效率和稳定性, 改善了进料性能, 许多在单螺杆挤出机上难以进料的具有很高或很低黏度以及与金属表面有很宽范围摩擦系数的物料, 如带状料、糊状料、粉料及玻纤料皆可加入; 第二, 它削弱了熔融态物料与螺杆和机筒间的黏滞性质对熔体输送机理的影响, 增强了螺杆的容积效应, 使螺杆特性线变硬及口模压力对挤出量的影响变小^[14, 15], 提高了熔体输送过程的稳定性; 第三, 啮合双螺杆可用计量方式加料, 只要加料量不超过挤出机的攪料能力(它取决于固体输送能力及螺杆和口模的特性线), 则加料量可以是一个与其他条件无关的允许独立操作工艺参数^[16]。

2. 混合作用

混合是螺杆挤出加工的一个重要方面, 对含多种成分的多相混合物料而言, 希望通过混合使分散相颗粒尺寸减小至适当程度并将其均匀分布在连续相中; 即使是对含分散相较少的近乎单相的加工对象, 也期望通过混合使它各部分有尽可能接近的应变及温度历程, 提高温度均匀性, 缩小分子量及其分布的差异, 以防止制品外观质量差, 减少内应力和翘曲变形, 提高其机械性能。啮合双螺杆及机筒之间存在四个间隙, 即径向间隙、侧向间隙、四面体间隙和螺棱间隙。物料流过它们时产生所谓的间隙漏流, 间隙漏流虽然给挤出量带来损失, 但也会产生不可低估的混合作用(称为间隙混合)。啮合双螺杆混合效果优于单螺杆, 而间隙混合做了重要贡献。

就啮合异向双螺杆而论, 由于 C 型小室的基本密闭阻碍了两螺杆间的物料传递, 在一定程度上损失了混炼能力, 但理论计算^[13]和流线示踪研究^[14, 15]表明: 密闭 C 型小室中同时存在沿螺槽和横过螺槽方向的环流, 由此形成的层流剪切部分补偿了混炼能力的损失。此外, 在啮合区压延间隙的出入口处, 螺杆一边将物料翻起, 一边又将其卷入。这种翻卷行为可产生较大的剪切强度, 因而改善了混合^[17, 18]。

啮合同向双螺杆区别于异向双螺杆的一个明显特征是在啮合区两螺杆的线速度方向相反, 它使得在啮合区同向双螺杆螺纹元件的混合效果优于异向双螺杆^[19-21], 因为:

(1) 它使得在啮合区两螺杆间的相对速度较大, 从而对啮合区(包括径向间隙、侧向间隙和四面体间隙内)物料的剪切速率和应力也较大。

(2) 它使得在啮合区产生较好的返混, 由此导致的返流混合比在异向双螺杆相应区域内由翻转行为产生的混合效果要好。

(3) 研究表明同向双螺杆中一根螺杆相对于对方的运动方式是彼此绕对方做平动, 因此在啮合区所有位置两螺杆的相对速度都相同, 故物料承受恒定的剪切速率, 混合更趋均匀^[22]。