

高等学校教材

高分子材料 成型加工设备

罗权焜 刘维锦 编



化学工业出版社

高等学校教材

高分子材料成型加工设备

罗权焜 刘维锦 编



化学工业出版社

·北京·

本书是根据高分子材料与工程专业本科教学大纲要求编写而成的高等学校专业教材。

本书共分8章,系统地介绍了高分子材料成型加工通用设备及液压传动基本理论和技术。书中图文并茂,详细阐述了混合搅拌设备,开炼机、密炼机、压延机、挤出机、注射机和液压成型机的用途、类型、结构、性能、工作原理方面的知识以及液压传动基础、液压元件和液压基本回路方面的内容。

本书可供高等学校高分子材料及成型加工等专业的本科生课程教学之用,也可供相关专业研究生和科研、生产技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分子材料成型加工设备/罗权焜,刘维锦编. —北京:化学工业出版社,2007.1

高等学校教材

ISBN 978-7-5025-9863-1

I. 高… II. ①罗…②刘… III. 高分子材料-成型-化工设备 IV. TQ315

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第011611号

责任编辑:杨菁

文字编辑:王琪

责任校对:陈静

装帧设计:潘峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张16 字数398千字 2007年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00元

版权所有 违者必究

前 言

《高分子材料成型加工设备》是按“高分子材料与工程”新专业教学大纲要求编写而成，供高分子材料与工程专业学生使用，适用课堂教学时间长度为60学时。

橡胶、塑料和化学纤维都是高分子材料，其成型加工设备有许多相似之处，有一些设备是通用的，如密炼机、压延机；但也有一些设备则有较大的差别，如挤出机、注射机等。这无疑使在编写本教材时增加一些困难，但编者仍然力图在同一章节中使用极有限的篇幅把这些既相似而实际上又有差别的设备阐述清楚。本教材是将橡胶、塑料和化纤工厂所使用的通用设备结合在一起编写的首次尝试。

本教材重点介绍内容是橡胶、塑料和化学纤维工厂主要的成型加工设备的种类、用途、结构、性能、工作原理和参数，为学生正确选择、使用、管理和维护这类成型加工设备打下良好的基础。

主要介绍开炼机、密炼机、压延机、挤出机、注射机和液压成型机的有关知识。另外，还专门编写了液压传动基础一章，以较大篇幅系统地详细介绍液压传动的基本理论和技术，其中包括液压传动基础，液压元件和液压基本回路。

本教材编写过程中，注意理论联系实际，着重培养学生分析问题和解决问题的能力。

在选材上，既做到重点突出又照顾到全面，力求内容精练、图文并茂，并注意尽量介绍国内外最新设备、新技术和发展趋势，这些内容贯穿于始终，分别融化在各章节之中。

各章后面附有习题、供复习和自学参考。

本教材是在使用过8届的讲义基础上编写而成。本次修订除了针对过去几年使用本教材中出现的问题和错漏作了修改之外，还重新编写了第二章和第七章，删去了这两章中一些不实用的内容，修正了与本书其他章节风格不协调之处，更新和补充了新内容，使全书各章风格保持一致。

本教材共分八章。编写分工如下：绪论，第一章第三节、第四节，第三章，第四章，第五章和第八章由罗权焜编写，第二章由郭建华编写，第一章第一节、第二节，第六章和第七章由刘维锦编写。全书由罗权焜统稿。

在编写过程和修订过程中，得到华南理工大学高分子系郭建华等多位老师的热忱帮助，特表感谢。同时向本书所列主要参考文献的作者们致以谢意。

由于编者水平限制，教材中缺点和谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2006年9月

目 录

绪论	1	二、混合分散机	67
一、高分子材料成型加工设备的历史与现状	1	三、Z形捏合机	67
二、高分子材料成型加工设备的特点和发展趋势	2	四、高速分散机	68
三、本课程的任务和要求	3	第四节 主要性能参数与工作原理	69
第一章 液压传动基础	4	一、主要性能参数	69
第一节 液压传动工作原理和特点	4	二、工作原理	70
一、液压传动工作原理	4	习题	70
二、液压传动的特点	4	第三章 开炼机	71
三、液压元件的分类	5	第一节 概述	71
第二节 液压传动基础知识	5	一、用途与分类	71
一、液压油的主要物理性质	5	二、规格表示与技术特征	71
二、液压油的选择	8	第二节 基本结构	72
三、液体的静压特性	8	一、整体结构与传动装置	72
四、流体动力学	10	二、主要零部件	74
五、液体流动的压力损失	12	第三节 主要性能参数与工作原理	82
六、液压冲击和汽蚀	15	一、辊速、速比与速度梯度	82
第三节 液压元件	17	二、接触角与横压力	83
一、油泵和油马达	17	三、工作原理	85
二、动力油缸	26	四、容量与生产能力	86
三、液压控制阀	32	五、塑炼、混炼过程中的功率变化规律	86
四、辅助元件	45	习题	87
第四节 液压基本回路	51	第四章 密炼机	88
一、压力控制回路	51	第一节 概述	88
二、速度控制回路	54	一、用途与分类	88
三、方向控制回路	57	二、规格表示与技术特征	88
四、顺序动作回路和安全回路	57	第二节 基本结构	89
习题	59	一、整体结构与传动系统	89
第二章 混合搅拌设备	60	二、主要零部件	91
第一节 概述	60	第三节 主要参数与工作原理	101
一、用途及分类	60	一、转子转速与速比	101
二、规格表示与技术特征	60	二、上顶栓压力	102
第二节 基本结构	61	三、工作原理	103
一、立式搅拌机	61	四、容量与生产能力	105
二、混合分散机	62	五、混炼过程功率变化规律和电动机的选择	105
三、Z形捏合机	63	第四节 其他类型密炼机简介	107
四、高速混合机	63	一、圆筒形转子密炼机	107
第三节 主要零部件	64	二、三棱形转子密炼机	108
一、立式搅拌机和卧式搅拌机	64	三、连续混炼机	108
		第五节 密炼机的上下辅机(配炼系统)	109

一、切胶机	109	三、纺丝联合机	176
二、炭黑、粉料输送和称量系统	112	习题	177
三、油料输送及称量系统	115	第七章 注射成型机	179
四、生胶及胶料的输送与称量系统	115	第一节 概述	179
五、加硫与压片系统	116	一、用途与分类	179
六、胶片冷却系统	116	二、注射机的组成	181
习题	117	三、注射机规格表示	181
第五章 压延机	118	第二节 整体结构和传动装置	182
第一节 概述	118	一、整体结构	182
一、用途与分类	118	二、螺杆传动系统	186
二、压延工作图	118	第三节 主要零部件	187
三、规格表示与技术特征	118	一、塑化部件	187
第二节 基本结构	120	二、合模装置	197
一、整体结构与传动系统	120	第四节 工作原理和主要参数	208
二、主要零部件	124	一、往复螺杆式注射机工作原理	208
第三节 主要性能与参数	134	二、注射机的主要参数	211
一、辊筒直径与长径比	134	第五节 注射机的液压传动和控制系统	218
二、辊速与速比	135	一、注射机的传动	218
三、超前系数与生产能力	136	二、注射机的控制	219
四、压延制品精度误差及挠度补偿办法	137	三、注射机的自动化	221
第四节 压延作业联动线	142	四、注射机的计算机控制	223
一、纺织物帘布压延联动装置	142	习题	223
二、钢丝帘布压延联动装置	145	第八章 液压成型机	224
三、塑料薄膜压延成型联动装置	147	第一节 概述	224
习题	147	一、用途与分类	224
第六章 螺杆挤出机	148	二、规格表示与技术特征	224
第一节 概述	148	第二节 整体结构与传动	226
一、用途与分类	148	一、模型制品平板硫化机和液压成型机	226
二、挤出成型设备的组成	148	二、平带平板硫化机	228
三、规格表示及技术特征	149	三、三角带平板硫化机	228
第二节 基本结构	150	第三节 主要零部件	230
一、整体结构及传动系统	150	一、液压成型机的受力分析	230
二、主要零部件	152	二、主要部件	230
第三节 工作原理与产量分析	162	第四节 工作原理与液压系统	236
一、工作原理	162	一、工作原理	236
二、产量分析	163	二、液压系统	236
第四节 特型螺杆和排气挤出机	166	三、液压系统压力计算	238
一、特型螺杆	166	第五节 生产能力	239
二、排气式挤出机	168	习题	240
第五节 挤出联动线	171	附录	241
一、橡胶挤出联动线	171	参考文献	249
二、塑料挤出机组	172		

绪 论

一、高分子材料成型加工设备的历史与现状

高分子材料成型加工包括橡胶、塑料、化学纤维及其复合材料的成型加工。由于橡胶具有独特的高弹性；塑料具有质量轻、比强度高；化学纤维具有高模量、高强度等特性。它们还具有优异的电气性能和优越的化学稳定性、耐磨性、不透气性和不透水性，吸震和消声、隔声等性能。因此，橡胶、塑料、化学纤维已在国防、科技、工农业生产、交通运输、医疗卫生和日常生活方面得到极广泛的应用。在现代社会中，可以这样说，从最尖端科学到日常生活，人们已经离不开橡胶、塑料和化学纤维了。橡胶工业、塑料工业、化学纤维工业已经成为国民经济中极重要的工业部门。

高分子材料成型加工设备是指橡胶厂、塑料厂和化学纤维厂在成型加工橡胶制品、塑料制品和化学纤维制品过程中使用的工具和机器，是橡胶工业、塑料工业和化学纤维工业的重要组成部分。高分子材料成型加工设备的水平标志着橡胶工业、塑料工业和化学纤维工业生产的技术水平，它对提高产品的质量和产量、提高生产效率、降低成本和能耗、改善环境和降低劳动强度等方面起着重要的作用。

和其他工业部门相比较，橡胶工业仍属于年轻的工业部门，塑料工业和化学纤维工业则是新兴的工业部门。所以，高分子材料成型加工设备发展历史比较短，只有一百多年历史。

自从1820年发明了第一台人力橡胶单辊炼胶机以后，人类就揭开了橡胶成型加工和设计、制造设备的新一页。接着，1839年开始使用橡胶硫化设备；1843年制成了压延机用于生产；1856年出现了柱塞式管子挤出机；1879年制造了螺杆挤出机；直到1916年才有了密炼机。以后，随着高分子材料合成新品种的不断面世和应用，才逐步完善了高分子材料成型加工设备。例如，塑料注射成型机在19世纪中后期已出现了，它是根据金属压铸原理制造出来的，但具有较高机械化水平的第一台柱塞式注射机直到20世纪30年代才应用于生产，40年代才将螺杆挤出机用于注射成型机的预塑化装置上，1956年出现的往复式螺杆注射机，标志着注射成型工艺技术已发展到一个新的历史阶段。

自20世纪60年代以来，由于电子、冶金、机械、液压、仪表和自动控制等工业部门的技术进步，带来了高分子材料成型加工设备的迅猛发展和更新换代，相继出现了一批更先进的设备和配套系统，特别是电子计算机和工业电视用于控制质量和管理生产，从而将高分子材料成型加工设备推进到一个划时代的新里程。其具有代表性的主要先进设备如下。

- ① 自动配料、自动称量和自动投料装置。
- ② 高压快速、大容量、新结构的密炼机。
- ③ 高精度、自动测厚、自动调距的压延机。
- ④ 高压高速、大容量、自动注射成型机。
- ⑤ 自动化成型连续硫化设备（鼓式硫化机、微波硫化自动生产线）。
- ⑥ 自动检测、自动包装生产线。
- ⑦ 新技术、新能源的开发利用，如激光无损探伤检验轮胎产品，远红外线干燥和硫化等。

当前，高分子材料成型加工设备继续朝着高速、高效、自动化方向发展。

现在中国有些橡胶厂、塑料厂已拥有先进的高精度压延机、快速密炼机、冷喂料挤出

机、复合机头挤出机和定型硫化机及机组，注射量达到 32000mL 的大型塑料注射成型机，螺杆直径为 200mm 的塑料挤出机和锁模力高达 2000t 的塑料液压成型机。特别是中国改革开放以来，不少工厂引进了国外先进技术水平的设备，使中国的高分子材料成型加工设备水平有很大的提高。

但是，中国还是一个发展中国家，人口众多，工业基础薄弱。从中国的高分子材料加工厂目前总体装备水平而言，虽然与改革开放前不能同日而语，但与先进工业国家比较，仍然存在很大的差距，尤其是自动化水平和检测技术仍较落后，造成手工劳动比例太高、劳动强度大、效率低、质量不稳定、产品成本高等。这些都是值得正视的现实，有待进一步深化改革开放、奋发图强，努力赶上世界先进水平。

二、高分子材料成型加工设备的特点和发展趋势

由于橡胶、塑料、化学纤维制品在国计民生中的重要作用以及橡胶、塑料、化学纤维制品种类的繁多，决定了其成型加工设备种类、形式的多样化和结构的复杂性。高分子材料成型加工设备的特点大致可以归纳为如下几点。

① 种类繁多，通用的少，专用的多。根据橡胶、塑料、化学纤维生产设备的种类、规格和用途的不同，目前国际上达到千余种，加上新材料的应用，新工艺的不断涌现，要求有新的设备满足工艺上的要求，因而新型成型加工设备仍层出不穷，所以通用设备始终是少数。例如，只有开炼机、密炼机、压延机、挤出机、注射机和液压成型机等为通用设备，其余则为专用设备。

② 低速重载，能耗巨大，旋转为主。无论是橡胶还是塑料、化学纤维，其成型加工过程本质上是依靠外力对高聚物施加变形功，使其变形或造型的过程。由于高聚物的物理特性，使得所消耗的能量是巨大的，而且通常又是在较低速度下进行，所以高分子材料成型加工设备配置电机功率很大，转速却很低。如开炼机因不同用途和规格配套电机功率为 5.5~380kW，而辊筒转速却只有 20r/min，辊筒产生的径向载荷达到十几吨力乃至几百吨力^①，密炼机配置的电机为 110~3000kW，而其转子转速只有 20~90r/min。

③ 参数多变，结构复杂，设备庞大。高分子材料成型加工过程，既有物理变化过程，也有化学变化过程。因成型加工工艺需要，有时要加热，有时要冷却，有时还要高的压力。有的设备如压延机、挤出机，在压延挤出成型过程需要调速以及和配套系统的传动同步；如注射机，要实施合模、开模、预塑化、注射等动作过程的机械化和自动化；又如轮胎定型硫化机，从自动装胎、定型、硫化、脱模取胎到后冷却一机完成，自动化程度相当高，所有这些都造成液压系统和气压系统复杂而庞大，而且对零部件的加工精度要求及仪表灵敏度要求极高。

④ 汽气水电，介质繁多。橡胶、塑料、化学纤维成型加工过程需要消耗大量的能量对高聚物材料加热塑化变形和造型，其能量形式包括汽、气、水、电。汽是指饱和蒸汽或过热蒸汽；气是指压缩空气；水则指过热水、高压水、低压水和冷却水；电则有交流电和直流电。此外，有的设备如液压成型机、注射成型机还单独设立液压站或液压泵，使用液压油传递动力和扭矩。在热能方面，除了电热和蒸汽以外，还有微波加热、远红外线加热等形式，这样使得高分子材料加工厂动力能源形式更加繁多。

从目前成型加工工艺方法而言，高分子材料成型加工主要设备，今后发展的方向，主要是提高精度，实现生产过程的机械化和自动化水平。其主要内容包括以下几方面。

① 改进现有机台，提高单机精度，创新和完善其配套附属设备。例如，使单项操作机

^① 1 吨力 = 10kN。

台改进为多项操作，手工操作为主改为自动或半自动操作。关键问题是提高控制、调节诸如机台的温度、压力或辊距、转速等参数的灵敏度和准确性。

② 将现有的各种单机组成生产联动线，如采用电子计算机和工业电视控制和管理生产，实现全面质量管理和生产过程的自动化。

③ 利用科技新成就，继续研究、设计和制造各种新的成型加工设备，用以改造或更新现有的老旧设备。

三、本课程的任务和要求

本课程是高分子材料与工程专业学生的必修专业课程和主干课程，是本专业学生在完成了工程力学、机械设计基础、电工和化工原理等技术基础课和高分子化学、高分子物理等专业基础课以后，并且完成了生产实习环节的基础上学习的专业课。

目前，无论是橡胶制品厂，还是塑料制品厂或是化学纤维厂，其生产用的主要设备基本上是定型的，但也存在一个如何利用这些设备组织生产和管理，最大限度充分发挥设备的能力，以及提高生产效率、降低成本等问题。设备的类型和性能往往影响到成型加工工艺过程，要考虑到设备与工艺的相互依赖和制约的作用，根据成型加工设备现实状况制定正确的工艺条件，达到优质、高产、低成本的经济指标。

本课程的任务是：通过学习，使学生基本掌握橡胶、塑料和化学纤维工厂主要设备的类型、结构、性能、工作原理、选型、使用维护、设备配置等方面的知识，还要了解设备的技术水平现状和发展趋势等知识。

在学习本课程时，要充分运用已经学习过的基础知识，力求理论联系实际，灵活运用，将专业理论、成型工艺和成型设备紧密结合，将成型设备课学活。

高分子材料成型加工设备类型规格达千余种，不可能也无必要逐一介绍所有设备，只能选择其中最具代表性的通用设备进行讲授。本课程将重点介绍开炼机、密炼机、压延机、挤出机、注射机和液压成型机等，另外还详细介绍成型加工设备中普遍使用的液压传动基础知识。要求学生在学习时要注意在理解的基础上，着重在提高分析问题和解决问题的能力上下功夫，做到触类旁通，举一反三，达到事半功倍的效果。

第一章 液压传动基础

第一节 液压传动工作原理和特点

一、液压传动工作原理

利用具有压力能的液体为工作介质，传递能量和动力的装置称为液压传动。其工作原理如图 1-1 (a) 所示。

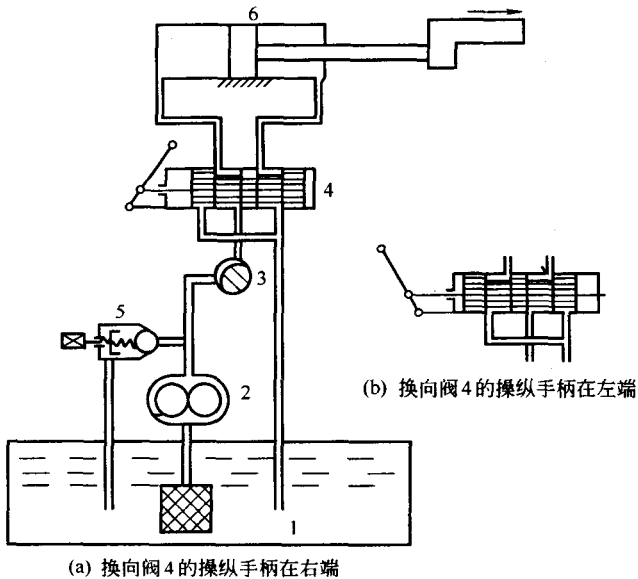


图 1-1 液压系统原理图

1—油箱；2—油泵；3—节流阀；4—换向阀；
5—溢流阀；6—油缸

如图 1-1 (a) 所示。

电动机带动油泵 2 从油箱 1 中吸油并加压输出，输出的压力油经节流阀 3、换向阀 4 进入工作油缸 6 的左腔，使活塞向右运动。工作油缸右腔的油经换向阀 4 流回油箱 1。当换向阀操纵手柄如图 1-1 (b) 所示位置时，则压力油通过换向阀进入工作油缸右腔，使活塞向左运动。从工作油缸左腔排出的油经换向阀流回油箱。因此，操纵换向阀就可以很容易地实现工作机构的换向。系统的工作压力由溢流阀与根据油缸负载大小调节；工作机构的速度由节流阀 3 来调节，而溢流阀 5 使多余的油排入油箱并起安全保护作用。

二、液压传动的特点

人类很早就懂得利用流体作为动力来驱动简单机械，以代替繁重的体力劳动。

然而，作为液压技术，则仅仅是最近几十年发展起来并逐步完善。因此，液压技术仍是一项新技术。由于科学技术和生产的发展，航空航天技术、运输机械、工程机械、建筑机械以及各类型工业设备都广泛地应用液压传动技术。

各行各业广泛应用液压技术，是因为其具有其他传动方式所没有的独特的以下优点。

- ① 液压传动与机械、电力和气动相比较，在输出同等功率的条件下，其结构紧凑，体积小，质量轻，容量大，承载能力强。液压元件已通用化和系列化。
- ② 采用液压传动能获得各种复杂的机械动作，便于实现自动化。
- ③ 可以在很大范围内实现无级调速。
- ④ 惯性小，动作灵敏，运动平稳，便于实现平稳和频繁换向。
- ⑤ 液压元件能自动润滑，改善了零件的摩擦状态，延长了使用寿命。
- ⑥ 能自动防止过载，保证安全，避免发生事故。

但是，液压传动也有一定的缺点，如下。

- ① 液压传动采用液体作为传递动力的介质，在液压元件运动表面和密封处容易产生泄漏，使系统效率降低。

- ② 油液的黏度随温度变化而变化，因此，温度的变化往往影响传动机构的工作性能。
- ③ 液压系统中油液渗入空气时，容易引发振动，影响工作质量。
- ④ 对液压元件的精度和质量有很高要求，加工难度大，系统发生故障时，检查排除比较困难。

但是，随着科学技术的发展，液压传动存在的缺点正在逐步得到克服，应用范围将愈来愈广。

三、液压元件的分类

液压系统由若干元件装配而成。液压元件根据其功能可以分为以下几大类。

- ① 动力元件 液压泵是液压系统的动力元件，其作用是将原动机的机械能转变为液压能供给液压系统。液压泵按结构分类有齿轮泵、叶片泵、柱塞泵、螺杆泵和转子泵。
- ② 执行元件 又称为液动机，其作用是将液压系统提供的液压能转变为机械能，拖动外部机构装置作机械运动。其结构和运动方式可分为液压马达、往复式液压缸和摆动式液压缸。
- ③ 控制元件 液压系统用阀作为控制元件。任何执行机构的运动都必须具有一定的力、速度和方向。这三个要素都是由阀控制的。阀可分为压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀。
- ④ 辅助元件 除了上述三类元件外，其他元件均为辅助元件，它主要用于液压能的储存，油路的连接和密封，油液的滤清、加温和冷却，液压系统某些参数的显示等。

第二节 液压传动基础知识

液压传动是用油液或其他液体为工作介质传递能量的。液压系统中液体的压力、速度和温度的变化很大，油液的质量和优劣也直接影响液压系统的工作。因此有必要了解油液的物理性质和特性，掌握液体平衡和运动规律，以便正确理解液压传动的基本原理和各种现象以及液压元件的结构和性能。

一、液压油的主要物理性质

(一) 油液的黏性

黏性是液体流动时表现的物理性质之一。当液体在外力作用下流动时，管壁的附着力使液体各层的运动不相同，如图 1-2 所示。另外，分子间的内聚力又使得液体内部产生内摩擦而阻止流层间的相对滑动。液体的这种性质称为黏性。表示黏性大小的物理量称为黏度。

黏性是选择液压油的主要参数，黏度的大小决定了它的流动性。因此，对液压系统的流量特性和压力损失有很大影响。如根据液压泵、阀、液压缸等元件的密封要求，油液必须具有一定的黏度，否则，黏度低使油液容易流失，而黏度过高，又会增加压力损失，降低效率，引起噪声或者使阀的动作不灵敏。

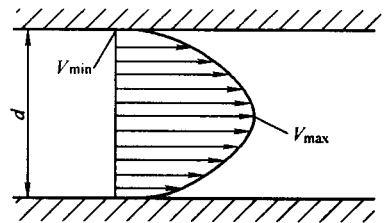


图 1-2 流体运动图

1. 黏度

黏度可用三种不同的单位表示，即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

(1) 动力黏度 动力黏度 μ 可用下式表示：

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dh}} \quad (1-1)$$

式中 μ ——动力黏度, Pa·s;
 τ ——单位面积上的内摩擦力, Pa;
 $\frac{du}{dh}$ ——速度梯度, s⁻¹。

动力黏度的物理意义是:当速度梯度等于1时,相邻两液层间单位面积上的内摩擦力。动力黏度的单位为 Pa·s。

(2) 运动黏度 运动黏度是指在相同温度下,液体的动力黏度与它的密度之比。

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-2)$$

式中 v ——液体的运动黏度, m²/s;
 ρ ——液体的密度, kg/m³。

中国液压油的牌号,是以 10⁻⁶m²/s 为单位标号的,是在温度 50℃ 时运动黏度的平均值。例如,10 号液压油,就是指这种油在 50℃ 时运动黏度的平均值是 10×10⁻⁶m²/s。

动力黏度和运动黏度都难以直接测量,一般仅用于理论计算。工程上常采用另一种可以用仪器直接测量的黏度表示方法,即相对黏度。

(3) 相对黏度 相对黏度是以液体的黏度相对于水的黏度的大小程度来表示该液体的黏度。中国采用恩氏黏度计来测定相对黏度,所以又称为恩氏黏度,用符号 °E 表示。这是工程上常用的黏度单位。

恩氏黏度的测定方法是将被测油液放在恩氏黏度计中,测出某一温度下从 φ2.8mm 的小孔流出 200mL 所需要的时间,然后求出它与蒸馏水在 20℃ 流出相同体积所需时间的比值,即为恩氏黏度。

$$^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-3)$$

式中 t_1 ——200mL 被测油液流过恩氏黏度计小孔所需要的时间, s;
 t_2 ——200mL 蒸馏水在 20℃ 温度下流过恩氏黏度计小孔所需要的时间, s。

温度在 t 时的恩氏黏度,用 °E _{t} 表示,在液压传动中,一般以 $t=50^{\circ}\text{C}$ 作为测定时的标准温度,用 °E₅₀ 表示。

按照乌伯洛德经验公式,恩氏黏度与运动黏度可按下式换算:

$$v = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \quad (1-4)$$

2. 黏度与温度、压力的关系

油液的黏度随着温度和压力的变化而变化。温度升高时,油液的黏度下降,这种现象在 50℃ 以下比较明显,在 50~100℃ 时变化较为平缓。液压系统中希望采用黏温性能好的油液,即希望黏度随温度的变化越小越好。特别是对精密机械来说,这一点很重要。因为黏度随着温度而变化,流量会发生波动,使运动不平稳。

液压油种类不同,其黏度随温度变化的规律也不同。对于运动黏度不超过 76×10⁻⁶m²/s 的矿物油,温度在 30~150℃ 范围内时,其运动黏度可用下式近似计算:

$$V_t = V_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad (1-5)$$

式中 V_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时油液的运动黏度, 10⁻⁶m²/s;
 V_{50} ——温度为 50℃ 时油液的运动黏度, 10⁻⁶m²/s;
 t ——温度, °C;
 n ——指数,其值可参考表 1-1。

表 1-1 指数 n 随黏度变化的数值

$V_{50}/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60	68	76
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56

工业上常采用黏度指数 (VI) 表示油液黏度变化的程度。黏度指数高, 黏度随温度变化小, 黏温性能好。油液的黏度指数值要求在 90 以上。

当压力增高时, 油液的黏度增大。一般在 30MPa 以下时, 黏度和压力差不多成线性关系, 变化不大。当压力极高时, 黏度会急剧增大。

(二) 油液的压缩性和膨胀性

液体的密度是随压力和温度而变化的。液体受压缩后, 分子间的距离缩短, 密度就会增加。液体的温度增加后, 分子的活动性增加, 液体的体积也随之增大, 密度就会减小。液体的压缩性和膨胀性就是表示液体的密度随压力和温度变化的特性。

1. 压缩性

油液压缩性的大小用压缩系数 β_p 表示, β_p 的意义是指当温度不变时, 每增加一单位体积所发生的体积 V_0 的相对变化量。即:

$$\beta_p = -\frac{\Delta V}{\frac{V_0}{\Delta P}} = -\frac{1}{V_0} \times \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (1-6)$$

式中 β_p ——压缩系数, Pa^{-1} ;

ΔV ——液体受压缩前后的体积变化值, m^3 ;

V_0 ——液体受压缩前的体积, m^3 ;

ΔP ——压力变化值, Pa。

因为 $\Delta V - S\Delta P$ 的变化方向相反, 压力增加时体积减小, 所以式中取“—”号。

液体受压缩后的体积可由下式计算:

$$V = V_0 - \Delta V = V_0(1 - \beta_p \Delta P) \quad (1-7)$$

液体的压缩性是很小的, 例如, 水的体积压缩系数一般选取 $\beta_p = 4.9 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$; 常用液压油的体积压缩系数 $\beta_p = (5.1 \sim 7.1) \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ 。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数。即:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-8)$$

式中 E_0 ——体积弹性系数, Pa。

水的体积弹性系数的平均值为 $E_0 = 2.04 \times 10^9 \text{Pa}$; 常用液压油的体积弹性系数 $E_0 = (1.37 \sim 1.96) \times 10^9 \text{Pa}$ 。它们和钢的弹性系数 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{Pa}$ 相比, 还不到其 1/100, 因此在一般液压传动的计算中, 当压力不大 (不大于 7MPa) 或液体容积较小时, 可以忽略液体的压缩性。但在压力较大、研究液体的振动和冲击时, 就必须考虑液体的压缩性。

2. 膨胀性

液体的膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 表示。它表示温度每升高 1°C , 液体体积所发生的相对变化量。即:

$$\beta_t = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-9)$$

式中 β_t ——体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$;

Δt ——温度变化值, $^\circ\text{C}$;

ΔV ——温度变化后体积的变化值, m^3 ;

V_0 ——温度变化前的体积, m^3 。

因此, 在温度变化为 Δt 时, 膨胀后的体积为:

$$V = V_0 + \Delta V = V_0(1 + \beta_t \Delta t) \quad (1-10)$$

常用液压油的体积膨胀系数 $\beta_t = (8.0 \sim 9.0) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

二、液压油的选择

在液压系统中, 液压油是传递动力的介质, 油液的性能会直接影响到液压传动的工作性能。因此, 选用液压油应满足以下要求。

- ① 黏度适当, 黏温性能好, 压缩性小。
- ② 良好的化学稳定性, 长期工作不变质。
- ③ 润滑性能好, 防锈蚀能力强。
- ④ 抗泡沫性和抗乳化性能好。
- ⑤ 无杂质和沉淀物, 不含有水溶性酸碱, 对液压元件和密封装置无侵蚀。
- ⑥ 燃点高, 低温用油要求凝点低。

在选择液压油时, 黏度是一个重要因素, 油液的黏度如果太高会使液压元件动作不灵, 或者引起油温上升, 但如果油液黏度太低, 油液易从系统机构的间隙中泄漏, 使系统效率降低, 影响系统的压力。因油液的黏度随温度和压力而变化, 所以在冬季和夏季、高压和低压时, 所选用的油液黏度应不同。一般冬季选 10 号液压油, 夏季选 30 号液压油, 中低压时选 20~40 号液压油, 高压时选 60 号液压油。

液压油在使用中应注意维护, 以保证所选油的性质。不允许水分和任何杂质混入油液中。在一般情况下, 液压油的更换周期为 1~1.5 年。

三、液体的静压特性

(一) 液体静压力及特性

液体的静压力是指液体在静止状态下, 单位面积上所承受的垂直作用力。物理上称压强, 工程上称压力。

静压力的形成如图 1-3 所示。在静止液体中, 取一点 A, 过 A 点取一微小面积 ΔA 。

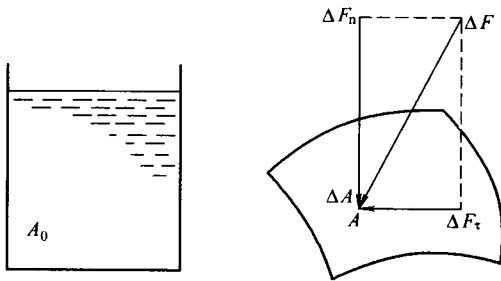


图 1-3 静压力的形成

ΔA 周围的液体对 ΔA 有作用力, 用 ΔF 表示, ΔF 的大小和方向与 ΔF 的位置及大小以及液体的性质有关。但是不管 ΔF 的方向如何, 总可以将其分解为两个力: 一个沿 ΔA 的法线方向的分力 ΔF_n ; 一个沿 ΔA 的切线方向的分力 ΔF_τ 。

由于液体具有流动性, 因此液体在静止时是不能承受切向力的, 否则液体就会流动。或者说在静止液体中, 沿 ΔA 的切线方向的分力 ΔF_τ 恒等于零。因此作用于面积 ΔA 上只有沿法向的分力 ΔF_n , 而液体是不能承受拉力的, 所以法向力的方向只能是指向面积 ΔA 。

如果液体上各点的压力是不均匀的, 则液体中某一点的压力为:

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right) \quad (1-11)$$

如果液体上各点的压力是均匀的, 则液体的压力为:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-12)$$

式中 F ——作用在液体上的外力, N;

P ——液体的压力, Pa;

A ——外力作用的面积, m^2 。

液体静压力有两个重要特性:

- ① 液体静压力方向永远沿着作用面的内法线方向;
- ② 静止液体中任何一点所受到的各个方向的液体压力都相等。

液体的静压力是由液体表面受外力作用和液体的自重产生的。后者和该点离液面的距离有关。因此, 静止液体中任意点的静压力应为:

$$P = P_0 + \gamma h \quad (1-13)$$

式中 P ——静止液体中任意点的静压力, Pa;

P_0 ——静止液体自由表面上的静压力, Pa;

h ——该点距自由表面的垂直高度, m;

γ ——液体的重度, N/m^3 。

式(1-13)即为液体静力学基本方程。

在液压传动中, 由外力引起的压力远远大于自重产生的压力, 所以自重产生的压力往往可以忽略不计。

(二) 静压传递原理——帕斯卡定理

由式(1-13)可知, 静止液体中任何一点的压力都包含了液面上的压力 P_0 , 故可以得出如下结论: 在静止液体中, 施加于静止液体等面上的压力将以等值同时地传递到液体的内部各点。这就是静压传递原理, 即帕斯卡定理。

根据帕斯卡定理及静压力的特性, 液压传动不仅能进行力的传递, 而且还能实现力的放大和方向的改变。如图 1-4 所示, 垂直液压缸的截面积为 A_1 , 其活塞上作用着负载 F_1 , 缸内液体压力为 $p_1 = F_1/A_1$, 水平液压缸的截面积为 A_2 , 其活塞上作用着一个推力 F_2 , 缸内液体压力为 $p_2 = F_1/A_2$, 由帕斯卡定理得 $p_1 = p_2$, 即:

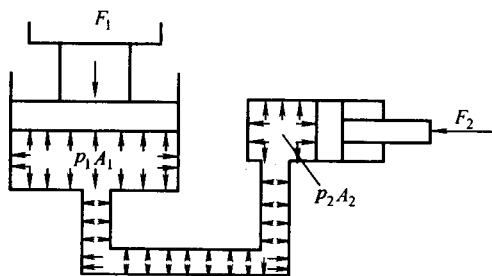


图 1-4 帕斯卡定理的应用

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \quad (1-14)$$

因为 A_1 比 A_2 大得多, 所以用较小的推力 F_2 就可以推动较大的负载 F_1 。如果没有负载 F_1 , 则推动水平液压缸活塞也不能在液体中形成压力, 这说明液压系统中的压力是由外界负载决定的, 这是液压传动中的一个基本概念。

(三) 液体压力作用在平面和曲面上的力

在液压传动中, 液体压力作用在平面和曲面上的情况是常常遇到的, 如图 1-5 所示。图 1-5 (a) 的承受压力表面是一平面。由于液体压力是均匀分布的, 而且垂直作用于此平面上, 所以, 作用在该平面上的力 F 就等于液体的压力 p 和承压面积 A 的乘积。即:

$$F = pA = p \frac{\pi d^2}{4} \quad (1-15)$$

图 1-5 (c) 的承受压力表面是一曲面。由于液体压力总是垂直于承压表面, 所以, 作用在曲面上各点的压力都是互不平行的, 在这种情况下, 作用力 F 就等于液体的压力和作用力 F

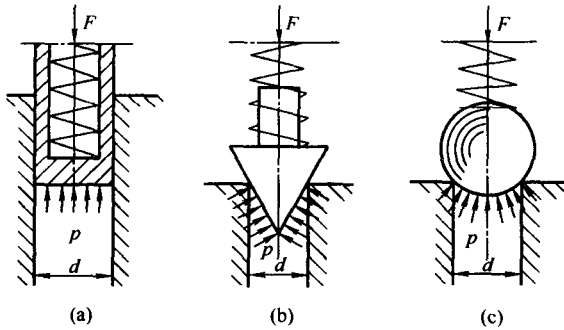


图 1-5 液体压力作用在平面和曲面上的力

(一) 理想液体和稳定流动

理想液体是指一种假想的没有黏性、不可压缩的液体。这样假设给研究问题带来很大方便。因为没有黏性，在流动时不存在内摩擦力，就没有摩擦损失。

稳定流动，是指在管内流动的液体的任一点压力、速度等运动参数都不随时间变化。与此相反，流动液体任一点的压力、速度等运动参数是随时间变化的，称为不稳定流动。

(二) 稳定流动的连续性方程

理想液体在管内作稳定流动时，由于假定液体是不可压缩的，即密度 ρ 是常数，液体是连续的，不可能有空穴存在，因此在管内各截面处流过的液体流量必然相等。图 1-6 为液体流过管路中的两个不同截面 1 和 2，流动截面 1 和 2 的流量 Q_1 和 Q_2 分别为：

$$Q_1 = A_1 v_1$$

$$Q_2 = A_2 v_2$$

式中 A_1 、 A_2 ——分别为截面 1 和 2 的面积， m^2 ；

v_1 、 v_2 ——分别为截面 1 和 2 的流速， m/min ；

Q_1 、 Q_2 ——分别为截面 1 和 2 处的流量， m^3/min 。

因为：

$$Q_1 = Q_2$$

所以：

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{1-17}$$

或

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \tag{1-18}$$

式 (1-17) 和式 (1-18) 表明，液体在管中作稳定流动时，通过任一截面的流量是不变的。截面小的流速大，截面大的流速小，这就是稳定流动的连续性方程。

(三) 欧拉运动方程

在流动的液体中，我们任意取截面为 dA ，长度为 dl 的微小流束为研究对象，如图 1-7 所示。对于不可压缩的流体流束来说，任一截面上的压力和速度都是位置和时间的函数。

设入口处的压力为 p ，则作用于出口处的压力为 $p + dp$ ，而 $dp = \frac{\partial p}{\partial l} dl + \frac{\partial p}{\partial t} dt$ 稳定流动时， $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ ，所以，出口处的压力为 $p + \frac{\partial p}{\partial l} dl$ 。该流束的重力为 $\rho g dA dl$ ，其方向垂直向下。

方向的投影面积 A_p 的乘积。即：

$$F = p A_p = p \frac{\pi d^2}{4} \tag{1-16}$$

式中 A_p ——作用力 F 方向的投影面积， m^2 ；

d ——阀座孔径， m 。

图 5-1 (b) 的作用力计算同图 5-1 (c)。

四、流体动力学

在液压传动中，油液总是不断地流动着，因此了解流动液体运动时的现象和规律是学好液压传动的基础。

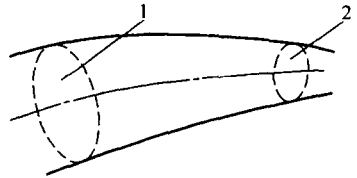


图 1-6 液体流动的连续性原理

如果不考虑液体的黏性，根据牛顿力学第二定律，有：

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

$$F = p dA - \left(p + \frac{\partial p}{\partial l} dl \right) dA - \rho g dA dl \cos \theta$$

$$\text{则 } p dA - \left(p + \frac{\partial p}{\partial l} dl \right) dA - \rho g dA dl \cos \theta = \rho dA dl \frac{dv}{dt}$$

式中：

$$\cos \theta = \frac{dz}{dl}$$

$$\text{又 } v = f(l, t)$$

$$\text{则 } \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial l} \quad (1-19)$$

对于稳定流动：

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

所以：

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial l}$$

将上式代入式 (1-19)，并考虑到压力和速度仅是位置的函数，得：

$$v \frac{dv}{dl} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{dp}{dl} - g \frac{dz}{dl} \quad (1-20)$$

式 (1-20) 就是理想液体的微小流束在稳定流动时的运动方程，也称欧拉运动方程。

(四) 伯努利方程

欧拉运动方程需要积分后才能实际应用，将上式对 l 进行积分，得：

$$\int v \frac{dv}{dl} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{dp}{dl} dl - g \int \frac{dz}{dl} dl + C$$

式中 C ——积分常数。

$$\text{即 } \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-21)$$

由于：

$$\gamma = \rho g$$

所以式 (1-21) 可写成：

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{常数} \quad (1-22)$$

式中 $\frac{v^2}{2g}$ ——单位质量液体所具有的动能；

$\frac{p}{\gamma}$ ——单位质量液体所具有的压力能；

z ——单位质量液体相对基准面所具有的势能。

式 (1-22) 称为理想液体稳定流动时的伯努利方程，也称能量守恒方程。它的物理意义是：理想液体稳定流动时，任一截面上的三种能量形式可以相互转换，但其能量总和不变。

式 (1-22) 又可写成：

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

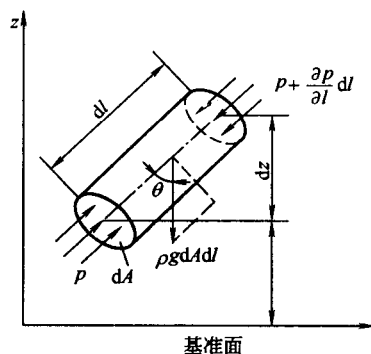


图 1-7 液体中微小流束的受力情况