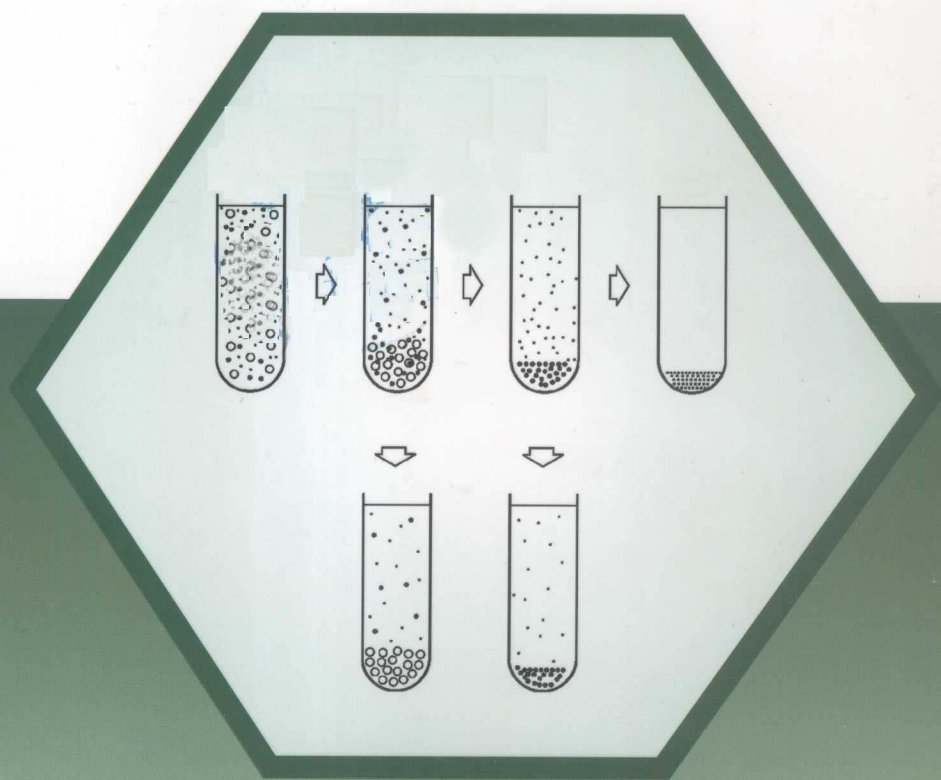


874596

现代分离科学与技术丛书

离心分离

◎ 金绿松 林元喜 主编



化学工业出版社

F2028

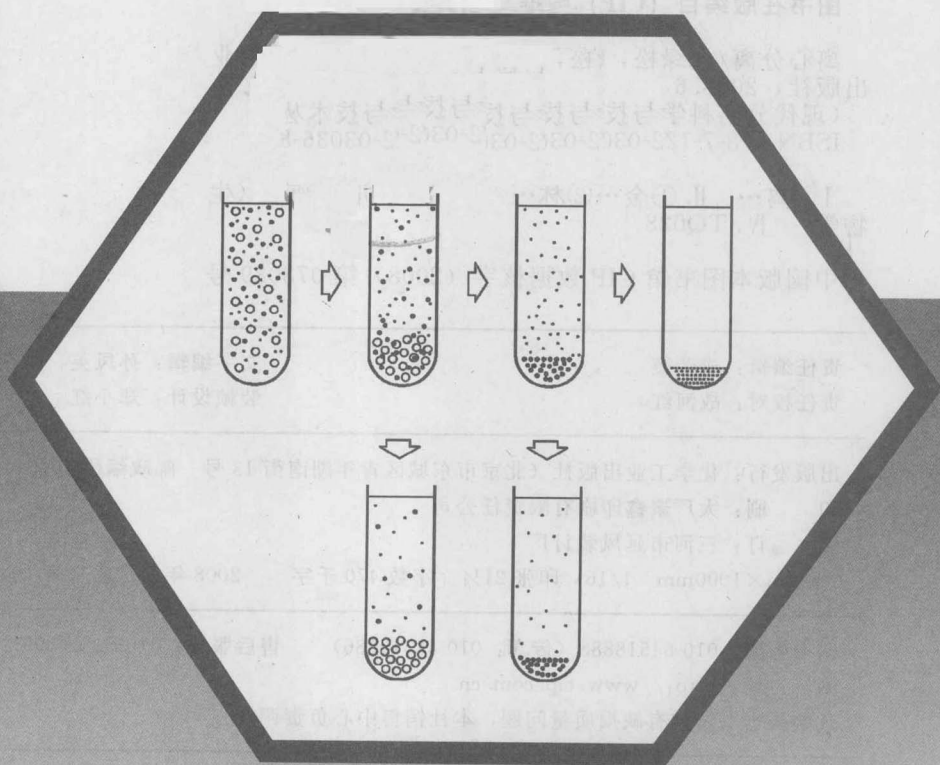
7

现代分离科学与技术丛书

874596

离心分离

◎ 金绿松 林元喜 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

离心技术是利用不同物质之间的密度等差异,用离心力场进行分离和提取的物理分离分析技术,广泛用于生物学、医学、农学、化学、化工等领域。本书对离心分离技术从原理到实践进行了较详细的介绍,尤其重点介绍了在生物学科研和生产中的实例。因此,在离心分离技术的理论和实际应用中,本书可起到工具书的作用。

本书可供生物学、农学、医学、化学、化工等领域的科研人员、实验室人员、管理人员和设备维修人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

离心分离/金绿松,林元喜主编. —北京:化学工业出版社, 2008.6
(现代分离科学与技术丛书)
ISBN 978-7-122-03036-8

I. 离… II. ①金…②林… III. 离心机-分离法(生物学) IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 078089 号

责任编辑:成荣霞

文字编辑:孙凤英

责任校对:战河红

装帧设计:郑小红

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)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张21¼ 字数470千字 2008年8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:49.00 元

版权所有 违者必究

《现代分离科学与技术丛书》编委会

顾 问 傅若农

主 任 张天佑

委 员 (按姓氏汉语拼音排序)

陈翠仙 高锡珍 郭孝武 金绿松

李 洲 林炳昌 杨基础 张天佑

赵 昱 郑群雄 朱 屯

序

随着科技的进步和产业的发展，在学科之间的交融越来越紧密的同时，学科分支的专业化也越来越明确。分离科学技术是人类剖析认识自然、充分利用自然、深层开发自然的手段；是获取真实和准确的分析鉴定信息的前提条件和技术保证。2000年，英国科学出版社邀请全世界500多位在不同领域从事分离科技工作的专家撰写并出版了一部巨著——《分离科学百科全书》（10册），本人参与了有关天然产物分离纯化方面的工作，深感其内容的丰富与广阔。2002年，美国出版了《分离科学一百年》，着重从色谱科技的进步说明分离科学技术的发展。

在我国科技界资深学者的倡导下，由化学工业出版社选题立项，经过十多位专家教授的分工合作，《现代分离科学与技术丛书》第一批（10个分册）将陆续出版。这是我国第一部关于分离科学技术的丛书，它的问世是我国科技界和产业界的一件喜事。

分离科学技术的门类很多，我们已经选定了《分离科学概论》、《溶剂萃取》、《超临界流体萃取》、《膜分离》、《离心分离》、《柱色谱技术》、《高速逆流色谱技术》、《模拟移动床色谱技术》、《结晶与沉淀》、《超声提取分离》等分册。随着分离科技的应用和发展，丛书的选题和内涵必将有新的拓展。《现代分离科学与技术丛书》的出版顺应于国际分离科学技术的发展潮流，又突出了我国在天然产物、生物医药、化工材料等优势科研与产业领域的特点和需要。

分离科学技术的门类很多，每一项分离技术都有它不同的理论、机理以及应用范围，各项分离技术之间是互补的和不可取代的。因此，我们希望广大的读者充分理解每项技术的基本原理，分析认识每项技术的实用领域，以期实现对于本丛书这一科技资源的有效利用和合理挖掘。

张天佑

2007年10月

前 言

离心技术是利用不同物质之间的密度、形状和大小的差异,用离心力场对悬浮液中的不同颗粒进行分离和提取的物理分离分析技术,它广泛用于生物学(生物工程和生物制品等)、医学、化学、化工等领域,而其设备——离心机是这些领域的必备设备。关于离心技术,国外自20世纪70年代起陆续出版过一些专著,各有侧重,几种书籍综合起来对该技术叙述较全面。国内这方面还没出过专著,而各科研单位和高校根据教学需要自编讲义,由于各自要求不同,这些讲义的重点也不同,而且大部分是内部材料,社会上难以共享。本书由中国仪器仪表学会实验室仪器学会离心机专业委员会的几位委员集体编写而成,他们长期从事离心机的工程研究、离心技术的应用研究和教学。本书是国内第一部内容较全面的离心技术专著。

本书共12章。第1章离心技术概述,由金绿松和卢太白合写,简要介绍国内外离心机的发展和常用离心技术。第2章离心机及其转子,由林元喜和金绿松合写,主要介绍离心机的使用者必须了解的有关离心机和转子的知识。这些“硬件”知识对离心机的使用效果有直接影响,本章还包括专门的离心机与转子安全性一节。国内发生的诸多“断轴”事故大部分是由于用户的操作不当引起的,所以该章的内容对用户的离心机使用安全极其重要。第3章由卢太白编写,第4章由林元喜和卢太白合写,第5章由林元喜、卢太白和黄祥瑞合写,第6章由林元喜和卢太白合写,分别介绍差速离心技术、密度梯度(速率区带和等密度)离心技术及梯度介质,这是最基本的技术。第7章细胞分离技术由王治伦和林元喜合写。第8、9章由林元喜编写,第10章由林元喜和金绿松合写,以丰富的实际工作介绍生物大分子、亚细胞和细胞分离。第11章分析超速离心技术及其应用,由黄祥瑞和陈立茵合写,有自己的工作事例。第12章与离心机有关的其他分离技术概述,由金绿松编写,介绍自抽连续离心技术和沉降场流分级技术,这些都是较新的分离技术,但还没推广普及。

在本书编写时避免了过多的数学推导及公式,力图言简意赅,便于不同领域读者阅读。本书在介绍主要离心方法及其应用的同时,尤其重点介绍了在生物学科研究和生产中的实例。在离心分离技术的理论和实际应用中,本书可起到工具书的作用。

化学工业出版社相关编辑与我联系编写本书事宜,当时我已退休多年,一套工作班子已不存在,难以胜任该书编写工作。因此,我就与全国离心机专业委员会中最年轻的委员——西安交通大学医学院的林元喜老师商量,在他的积极支持和鼓励下决定接此任务,并与另外两位委员黄祥瑞(军事医学科学院)和卢太白(西北农林科技大学)一起在北京召开编委会会议商定编写大纲和分工协调,于是本书的编写工作才得以顺利开展。

本书可供生物学、农学、医学、化学、化工等领域的科研人员、实验室人员、管理人员和设备维修人员等参考。读者可把本书当作专业教科书,学习基本概念、理论;也可当作工具书,带着问题在书中找有关实际应用内容。

感谢北京市新技术应用研究所张天佑教授把我介绍给出版社；也感谢责任编辑对我工作的大力支持。

金绿松

(中国科学院生物物理研究所 研究员
中国仪器仪表学会 实验室仪器学会 离心机专业委员会 主任)

2008年6月于北京

目 录

第1章 离心机发展与离心技术概述	1
1.1 国外实验室离心机的发展概况	1
1.2 中国实验室离心机的发展	6
1.3 离心分离方法与应用	8
1.3.1 差速离心法	9
1.3.2 密度梯度离心法	9
1.3.3 分析离心	11
1.3.4 区带离心	12
1.3.5 沉淀离心法	13
1.3.6 其他离心方法	13
参考文献	14
第2章 离心机与转子	16
2.1 离心机的分类	16
2.1.1 低速离心机	16
2.1.2 高速离心机	17
2.1.3 超速离心机	17
2.2 离心转子	18
2.2.1 转子的材料	18
2.2.2 转子的分类	20
2.3 离心管及其附件	27
2.3.1 离心管的材料	27
2.3.2 离心管的密封方法	29
2.3.3 离心管的适配器	29
2.4 离心机与转子的安全性	30
2.4.1 离心转子的安全设计	31
2.4.2 离心机的使用安全	33
参考文献	38
第3章 差速离心	40
3.1 差速离心的基本原理	41
3.1.1 颗粒离心沉降理论	42
3.1.2 离心时间的估算与转子参数	44
3.2 差速离心法	48
3.2.1 差速离心	48
3.2.2 差速离心中的基本计算	48
3.2.3 生物样品 s 、 n 、 t 的校正	50
3.2.4 差速离心中沉降物质的分布	52
3.2.5 回收沉淀的差速离心	52

3.2.6	回收上清液的差速离心	53
3.2.7	全周期差速离心	54
3.3	差速离心的应用及注意事项	54
3.3.1	植物亚细胞器与病毒颗粒的分离	54
3.3.2	差速离心注意事项	55
3.3.3	转速 n 与离心加速度 G 的估算	56
3.3.4	RCF 选择换算	57
	参考文献	57
第4章	梯度介质及梯度的制备和密度测定	58
4.1	梯度介质	58
4.1.1	常用梯度材料	60
4.1.2	梯度介质的特性比较	71
4.2	密度梯度的制备	79
4.2.1	配制密度梯度溶液	79
4.2.2	阶梯梯度(不连续梯度)的制备	80
4.2.3	连续梯度的制备	81
4.3	加样方法	86
4.3.1	对样品的要求	86
4.3.2	加样量	87
4.4	梯度回收方法	89
4.4.1	直接回收区带	89
4.4.2	定位区带收取	90
4.4.3	梯度区带的连续收取法	91
4.5	梯度溶液的密度测定	92
4.5.1	密度球标记法	92
4.5.2	计数密度计直接测定法	92
4.5.3	流动检测系统	92
4.5.4	折射率法	93
	参考文献	93
第5章	速率区带离心法	95
5.1	基本原理	95
5.2	速率区带离心的梯度	96
5.2.1	等动力梯度	96
5.2.2	等体积梯度(isovolume gradient)	97
5.2.3	复合梯度	99
5.3	离心速度和时间的计算方法	100
5.3.1	$\omega^2 t$ 算法	100
5.3.2	k' 系数估算法	100
5.3.3	沉降估算辅助(SEA)图[sedimentation estimation aid (SEA) charts]	101
5.3.4	$sw^2 t$ 图	102
5.3.5	McEwen 法估算离心条件	104
5.4	速率区带离心在实际应用中应考虑的事项	110
5.4.1	梯度的密度范围	110

5.4.2	区带的稳定性	110
5.4.3	梯度的体积和温度	111
5.4.4	区带的分辨率	111
5.4.5	速率区带离心成功的准则	112
	参考文献	112
第6章	等密度离心法	113
6.1	等密度梯度离心原理	114
6.2	等密度梯度离心的基本条件选择	114
6.2.1	等密度梯度离心的选择	114
6.2.2	等密度梯度离心	115
6.2.3	平衡等密度梯度离心中颗粒到达平衡所需时间	122
6.2.4	预形成密度梯度	124
6.3	等密度梯度离心的特点和应用	126
6.3.1	等密度梯度离心	126
6.3.2	等密度梯度离心的应用	126
	参考文献	127
第7章	细胞分离	128
7.1	分离细胞的基本离心方法	128
7.1.1	根据密度进行分离	128
7.1.2	根据沉降速度进行分离	129
7.1.3	分离细胞的梯度介质和梯度类型	132
7.2	影响细胞分离的因素	133
7.2.1	细胞间的相互作用	133
7.2.2	介质对细胞体积和密度的影响	134
7.2.3	样品装载量	134
7.2.4	壁效应	135
7.2.5	潮流(小滴沉降)	135
7.2.6	离心力	136
7.2.7	分离温度	136
7.2.8	在分离过程中细胞所处状态	136
7.2.9	悬浮液体积	136
7.2.10	转子操作	137
7.3	设计细胞分离方法的指导路线	137
7.4	分离细胞的实验方案	138
7.4.1	分离血液细胞	138
7.4.2	分离肝脏细胞	146
7.4.3	分离心肌细胞	153
7.4.4	等密度离心在分离其他哺乳细胞中的应用	155
7.5	细胞的速度沉降分离	155
7.5.1	速度沉降法分离细胞主要影响因素	156
7.5.2	按细胞沉降速度分离的基本方法	156
7.5.3	细胞的离心淘洗分离	157
	参考文献	162

第8章 细胞器和细胞膜的分离	163
8.1 组织与细胞的匀浆方法	163
8.1.1 机械匀浆方法	164
8.1.2 匀浆介质	165
8.1.3 匀浆策略	167
8.1.4 评价匀浆效果	168
8.2 组织匀浆的离心和各部分的组成	169
8.2.1 亚细胞颗粒的物理特性	169
8.2.2 组织匀浆离心和各部分的组成	169
8.2.3 梯度纯化	172
8.2.4 分离亚细胞器的梯度介质	173
8.3 评价分离纯化效果	175
8.4 若干亚细胞器分离纯化方法	177
8.4.1 分离细胞核	177
8.4.2 分离线粒体	188
8.4.3 分离质膜	195
8.4.4 分离过氧化物酶体	198
8.4.5 分离溶酶体	203
参考文献	206
第9章 分离生物大分子	208
9.1 用等密度离心法分离生物大分子	208
9.1.1 生物大分子在不同梯度介质中的浮力密度	208
9.1.2 转子选择	209
9.1.3 选择梯度介质	210
9.1.4 梯度斜率	210
9.1.5 到达平衡的时间	211
9.1.6 等密度区带离心的分辨率	212
9.2 速率区带离心法	213
9.2.1 转子选择	213
9.2.2 选择梯度介质和溶剂	214
9.2.3 选择梯度形状	215
9.3 若干生物大分子的分离和纯化方法	216
9.3.1 分离核酸	216
9.3.2 分离细胞核其他大分子	237
9.3.3 分离脂蛋白	238
参考文献	248
第10章 在区带转子中的分离	250
10.1 概述	250
10.1.1 命名和分类	251
10.1.2 半径-体积关系	253
10.1.3 样品浓度和装载容量	253
10.2 旋转密封(动态加载)区带转子	255
10.2.1 设计	255

10.2.2	使用要点	256
10.2.3	装载转子	256
10.2.4	离心实验运转	259
10.2.5	卸载和回收样品	260
10.2.6	样品体积	260
10.2.7	商品类型	261
10.3	重定向梯度区带转子	261
10.3.1	设计	261
10.3.2	操作策略	262
10.3.3	梯度重定向	262
10.3.4	在重定向转子中的梯度设计	265
10.3.5	商品重定向梯度区带转子	265
10.3.6	A 型、B 型和重定向区带转子的应用	267
10.4	连续流离心技术	269
10.4.1	设计	269
10.4.2	操作策略	270
10.5	区带离心过程中易出现的问题	275
10.5.1	交叉漏液	275
10.5.2	气泡	276
10.5.3	温度控制	276
10.5.4	转子体与盖间的配合	277
10.6	区带转子在实际中的应用	277
10.6.1	细胞分离	277
10.6.2	分离大分子(分离核糖体及亚单位)	279
10.6.3	生产疫苗	281
	参考文献	283
第 11 章	分析超速离心技术及其应用	284
11.1	分析超速离心机及其转子	284
11.2	光学系统	287
11.3	分析超速离心的一般原理	287
11.4	分析离心基本理论	289
11.4.1	沉降速度	289
11.4.2	沉降平衡	290
11.5	沉降系数的测定	291
11.5.1	沉降系数测定实验方法选择	292
11.5.2	沉降图形的评价	292
11.5.3	沉降系数测定实例	295
11.5.4	影响沉降速度因素分析	296
11.5.5	证明样品均质性的一般原理	298
11.5.6	沉降系数(s)值的校正	298
11.6	分子量测定	299
11.6.1	常规沉降平衡法	299
11.6.2	弯月面耗尽沉降平衡法	299

11.6.3	超短柱沉降平衡法	300
11.6.4	Archibald 法	300
11.6.5	用经验公式估算核酸分子的分子量	300
11.6.6	常规沉降平衡法的实验操作	300
11.7	扩散系数的测定	302
11.7.1	Schlieren 光电扫描扩散系数测定实例	302
11.7.2	吸收光学系统光电扫描扩散系数测定实例	303
11.7.3	扩散系数测定中的误差分析	303
11.8	偏微比容的测定	304
11.9	分子形状与大小	305
11.9.1	f'/f_0 (摩尔摩擦系数比)	305
11.9.2	未水合圆球形分子在溶液中的形状和大小	305
11.9.3	水合非球形蛋白分子的形状和大小	306
	参考文献	307
第 12 章 与离心机有关的其他分离技术概述		308
12.1	自抽连续离心机	308
12.1.1	原理	308
12.1.2	应用	311
12.2	沉降场流分级技术	315
12.2.1	场流分级概述	315
12.2.2	沉降场流分级	320
	参考文献	325

第1章 离心机发展与 离心技术概述

1.1 国外实验室离心机的发展概况

在透明的玻璃杯中倒入开水,在北京等水质偏硬的地区就能看到一闪一闪的小片状物慢慢下沉,稍大一些的沉得快一些。过一段时间就能看到杯底有一层白的水碱。这个现象实际上是水碱颗粒在玻璃杯水中受自身重力作用而发生的沉降,它完成了水碱颗粒和水之间的分离。在地球引力场中,任何物体都受其质量与重力加速度之积大小的重力作用,质量越大,重力就越大,沉底的速度就更快。在玻璃杯中泡茶时也发生类似的现象。在人们的生产实际中,很多情况下把含待沉淀物质的液体在大容器或大槽中搁置很长时间以达到沉淀的目的,当然这太费时,效率太低。

为了加大分离能力,人们制造了离心机(centrifuge),当其转子高速旋转时产生的离心加速度是重力加速度(g , 981cm/s^2)的很多倍,所受的力是重力的很多倍,分离能力也提高了很多倍。在自然搁置状态下需一整天才能完成的沉淀在离心机里可能几个小时或更短时间内就能完成。更重要的是在自然搁置状态下根本无法分离的操作在离心机中就能实现。光学显微镜的发明使人们观察到细菌,离心机则使人们提取到细菌以及后来的病毒,如肝炎病毒等。

用离心机对样品进行分离、纯化和提取的操作统称为离心分离操作,其技术为离心分离技术,简称离心技术(centrifugation),是本书的内容。离心机的应用很广泛,本书将着重介绍其在生物学实验室中的应用。

离心机根据所用行业或规模分为工业用离心机与实验室用离心机。工业用离心机的处理材料量大而离心机的体积和重量也大,但分离的精确度较差,主要用在工业生产中。本书中主要叙述实验室用离心机。实验室用离心机的处理量较小,离心机的体积和重量也较小,但分离的精确度较好,主要用在实验室中的分离提取与分析研究中。起初的超速离心机是分析用的,约10年后出现了制备超速离心机后该技术才逐步推广使用,尤其是低速冷冻大容量离心机和高速冷冻离心机的陆续出现使离心机成为真正有力的常规仪器设备。离心机产品系列的完善满足了用户的各种使用要求,促进了生物化学等相关领域的发展。在离心机系列中超速离心机的设计和制造技术难度最大,而其在分子生物学等现代生物学中的广泛应用又促进了超速离心机的设计和制造技术的发展,使其成为很完善的实验设备。离心机在近代科学中的出现是以超速离心机开始的,而它的设计和制造技术代表了离心机的最高科技水平,因此本节重点介绍超速离心机的设计和制造技术的发展概况。

(1) 超速离心机的定义及其设计方案

超速离心机 (ultracentrifuge) 按其发明人 T. Svedberg 的定义为“在离心场中能定量地进行沉降测定的计量仪器”。按此定义, 如能进行这种测定的离心机即使转速低也可以是超速离心机, 若不符合这一定义者, 即使转速很高也不能叫超速离心机。T. Svedberg 建议把后者叫作 supercentrifuge, 而此名后来在美国 Sorvall 公司产品中使用。

后来人们把超速离心机中符合上述定义的叫分析超速离心机 (analytical ultracentrifuge), 而只是用来制备用的叫制备超速离心机 (preparative ultracentrifuge)。20 世纪中期有的制备超速离心机能加分析附件, 而分析超速离心机也都带几个制备用的离心转子, 所以分析超速离心机和制备超速离心机两者之间只是在使用上有侧重, 从超高速旋转的主传动系统来说并无根本区别。

现在人们通常以产生离心加速度的大小或最高转速作为标准来对离心机进行分类, 请见本书的第 2 章。

超速离心机要求下述力学性能:

- ① 振动小、噪声低;
- ② 转速稳定;
- ③ 离心转子的温度随时间变化和随位置变化的温度梯度要小;
- ④ 运转中能进行准确的温度测量;
- ⑤ 能加各种保险装置。

能满足上述要求的驱动方法是有限的。人们在几十年的超速离心机的发展过程中曾试用过很多方案, 可归纳为:

- ① 油涡轮驱动方式。
- ② 空气涡轮驱动方式。
 - a. 直接驱动式; b. 间接驱动式。
- ③ 蒸汽涡轮驱动方式。
- ④ 电气驱动方式。
 - a. 电机直接驱动方式; b. 皮带传动式; c. 涡轮蜗杆增速式; d. 齿轮皮带增速式; e. 高速电机齿轮增速式; f. 直接驱动式。

其中曾经有过商品或尚有定型商品的有: 油涡轮驱动式、间接空气涡轮方式、直接空气涡轮方式、电机直接驱动方式、齿轮皮带增速式和高速电机齿轮增速式。目前的超速离心机是变频电机直接驱动结构。

瑞典物理化学家 T. Svedberg 为了确定胶体颗粒大小的分布, 进行过多年的研究, 曾利用当时可利用的各种方法, 始终没能解决。最后把胶体混合到水中, 再用光学方法测定溶液的浓度分布情况, 这是超速离心机的创意。T. Svedberg 受聘于美国 Wisconsin 大学任客座教授时和研究生一起制作光学离心机 (optical centrifuge)。他们在照相底版上得到了着色胶体溶液的沉降过程, 但除离心过程中的沉降之外, 还有沿管壁的对流所引起的颗粒移动, 所以没能够进行定量解析。T. Svedberg 自 1923 年回国之后, 一方面从事理论研究, 另一方面在暂不使用的卫生间里制作了世界上第一台超速离心机。这台离心机是把用于牛奶加工的乳油分离器 (cream separator) 改装而成的, 经齿轮增速达到 10000r/min, 5000g, 但用这种离心机还不能进行蛋白质分

子沉降研究,它需要更强大的离心力场。

(2) 油涡轮驱动超速离心机

油涡轮驱动超速离心机是 T. Svedberg 等人为了建立更强大的离心场,从 1926 年起进行研究的机型。从那时一直到 1939 年的十几年间不断进行改进,先后制造过 23 种离心转子,曾达到最高转速 75000r/min,在离心池中心的最大离心加速度达 429000g。较成熟的机器是 T. Svedberg 与蒸汽涡轮公司合作制成的。它是用 15HP 油泵打出压力油,经冷却器后喷射驱动油涡轮,横放的离心转子两端各有涡轮,离心室不是真空而是从高压容器供给氢气,同时用真空泵保持 2.67kPa(20mmHg)左右的真空度,以求钢制离心转子温度的稳定。这是分析用超速离心机,它后来由瑞典的 LKB 公司生产出售。该机作为世界上首次出现的实用超速离心机对有关学科的发展起了促进作用,但 T. Svedberg 的机器制造技术到“Die Ultrazentrifuge”(1940 年)一书出版才公开。后来,美国 Sorvall 公司生产了现代的油涡轮超速离心机,转子在上,使用上与其他驱动形式的超速离心机一样方便。1992 年的 pro80 型机带动 $8 \times 12.5\text{mL}$ 钛转子,最高转速 80000r/min,最大离心加速度 605000g(Ti 合金转子),到 20 世纪末停产。Beckman 公司等其他超速离心机厂商都生产电机-齿轮传动型超速离心机时,Sorvall 公司的涡轮驱动产品运转得更平稳,噪声更小,优于齿轮传动型机,但用户对离心机需要反复启动使用时,油涡轮用油箱的冷却跟不上。到 20 世纪 80 年代以后,变频电机直接驱动的超速离心机更替齿轮传动型而普及后,Sorvall 公司的油涡轮超速离心机只好退出市场。西安医科大学等单位进口过油涡轮超速离心机。

(3) 空气涡轮驱动超速离心机

T. Svedberg 等在瑞典 Uppsala 大学研究油涡轮超速离心机的时候,美国人正在进行空气涡轮驱动离心机的研究工作。E. Henriot 和 E. Huguenard 在 1925 年发表了陀螺型转子高速旋转装置的文章。转子是陀螺型,其圆锥面上刻有槽,并用压缩空气吹这些槽,使带该槽的陀螺型转子在高速旋转的同时悬浮起来。这个装置里没有机械轴承,只有空气轴承,该机型经改进后由 Beckman 公司生产。J. W. Beams 等对该装置进行改进后,用高压氢气吹直径 19mm 的小“陀螺”,达 $120 \times 10^4\text{r/min}$ 。他们又在该装置上加了 T. Svedberg 的光学系统,对蛋白质等进行测定,但因为离心转子直径小,测定没成功。可直径一大,空气阻力就非常大,转速上不去。

J. W. Beams 和 E. G. Pickels 从上述“陀螺”引出轴至真空腔中,该细轴在真空腔中带动大转子旋转。因为大转子在真空中旋转,从而大大减小了空气摩擦。该方法和 T. Svedberg 的装置一样,可使转子旋转至其材料强度所允许的极限转速。该设计的另一重大特点是在超速离心机设计中第一次使用了 1883 年瑞典工程师 C. G. P. de Laval 发明的挠性轴对转子的自动调心原理,这一点在超速离心机的设计中是一项革命。这个装置虽后经种种改进,但其基本结构没变。该装置的特点是只要换一下离心转子,离心机既可用于分析,也可用于制备。J. H. Bauer 等设计出制备用离心转子,并分离出病毒。较典型的设计是 1938 年 E. G. Pickels 设计的装置,它主要由空气驱动涡轮、支推空气轴承、真空腔、离心转子、压缩空气系统和光学系统组成,所用的轴是外径约为 3mm 的挠性轴。这种超速离心机经改进后在 New York 的 Rockefeller

研究所使用至第二次世界大战结束为止。J. W. Beams 教授由于他的超速离心机在美国原子弹研制上的贡献, 获总统奖。该研究所又是空气涡轮超速离心机生产厂家, 后来由德国的 Phywe 公司、VEB Carl Zeiss Jena 公司, 以后又由匈牙利光学仪器厂生产。日本也进行过研制, 但没有产品。在空气驱动超速离心机里使用铝合金转子, 转速达 60000r/min ($300000g$)。中国医学科学院病毒研究所 (北京)、北京医学院、上海第一医学院等进口过空气涡轮驱动超速离心机。笔者在进行“炸头”实验时的驱动设计也是这种方案。连 18000r/min 的高速电机都不能解决的当时国情下, 达到 80000r/min 以上的转速, 空气涡轮驱动曾经是难得的可行方案。

(4) 高速电机-齿轮传动超速离心机

早在 1924 年 T. Svedberg 等人试过这种方案, 但当时的轴承等工业水平有限, 没能实现。E. G. Pickels 于 1945 年离开 Rockefeller 研究所, 自办 Spinco 公司继续研究超速离心机, 他把空气涡轮驱动超速离心机中的空气涡轮部分用高速电机带动的齿轮箱代替, 制造出第一台分析用超速离心机以及制备用超速离心机。而後者的出现使得超速离心机在全世界得到大力推广。它与空气涡轮超速离心机相比, 体积小、结构紧凑。尤其是制备型机离心转子在上方, 便于经常装取转子, 易于多种转子的互换, 而且一次分离样品多, 所以非常方便。20 世纪 60 年代初 N. G. Anderson 研究区带转子和连续超速离心机时, 他们是在 Spinco 公司的 L 型制备用超速离心机上改装的。高速电机-齿轮传动超速离心机后来除美国 Spinco 公司 (后合并到 Beckman 公司) 生产外, 美国 IEC 公司、英国 MSE 公司、前联邦德国 Heraeus Christ 公司、前民主德国 Janetzki 公司、瑞士 Kontron 公司和日本日立公司都有生产, 基本结构大同小异。其最高转速超过 75000r/min , 是 20 世纪 70 年代初首先由 Beckman 公司用钛合金制造离心转子达到的。此类产品经 20 多年的进步, 20 世纪 80 年代钛合金转子最高转速 $75000\sim 83000\text{r/min}$ (最大离心加速度约 $500000\sim 600000g$), 速度控制精度在 1% 以内, 真空度 1.33kPa (10Torr), 从 $0\sim 40^\circ\text{C}$ 之间温度控制精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$, 而样品温度稳定度可保持在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。有铝制和钛制的各种转速和容量的固定角度转子、甩开转子和区带转子等共几十种, 有各种保险装置以保证机器安全使用, 可配备分析附件兼作分析离心机用。后也配 N. G. Anderson 等人发明的区带转子, 但就其驱动结构与各种转子的基本结构并无变更。在转子的温度测量和超速保险等方面, 各种型号超速离心机的情况不尽相同。

笔者等在中国科学院生物物理研究所于 1974 年年底在我国第一次研制成功的 CL-60 制备用超速离心机是高速电机-齿轮传动结构, 全部用国产元件材料, 最高转速 60000r/min (最大离心加速度 $300000g$)。

(5) 电机直接驱动超速离心机

T. Svedberg 等人最初试用电机-齿轮增速方案失败之后, 用该方案带外径为 150mm 转子, 转速达 18000r/min 。当时因电机本身受不了高转速下的离心力, 所以放弃了此方案, 继而研究油涡轮驱动超速离心机, 当时他们认为涡轮是得到高转速的最好方法。

1940 年, J. W. Beams 用电机取代了空气涡轮间接驱动超速离心机上的空气涡轮。电机是用商品电扇改装的, 变频调速, 带 152mm 直径转子, 在 30min 之内达