

高等学校试用教材

离心分离理论

张存镇 主编
王承书 审校
葛福

原子能出版社

高等学校试用教材

离心分离理论

张存镇 主编

王承书 审校

诸葛福

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

(枇杷山后街79号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 $1/32$ ·印张 8.75·字数 226 千字

1987年6月北京第一版·1987年6月重庆第一次印刷

印数 1—1,700·统一书号: 15175·815

定价: 1.45元

内 容 提 要

本书全面阐述了用高速气体离心机分离同位素的基础理论，既介绍了同位素分离技术和离心机的基本物理原理，又阐明了离心机分离性能的各种分析计算方法。主要内容有离心机的分离效应、离心机的分离功率、离心机流体动力学和离心机分离性能参数的优化等。

本书是高等学校的专业教材，是关心和从事核能应用的科技人员的重要参考书。从事化学化工方面的生产科研人员也可参考。

序 言

近年来，作为核燃料生产重要环节的铀同位素分离技术的发展很快。继气体扩散技术之后，离心分离技术受到很大重视，并已发展到工业生产规模。

本书是根据原二机部教育局召开的教材编审会议审定的选题编写的。书中系统地介绍了离心分离技术的基础理论知识。

本书以阐述离心法分离同位素的基本理论为主要内容，为了便于读者熟悉同位素分离技术的专门知识，对有关的基本物理概念也作了必要的说明。在编写过程中编者力求既讲清直观的物理概念，又不忽略严格的数学处理，并把物理概念和数学方法有机地结合起来。本书可作为高等学校的专业教材，亦可供有关科技人员参考。

本书的编写工作是在清华大学工程物理系物理分离教研组的主持下进行的，由张存镇同志任主编。蒋同远同志参加第一、二章初稿编写的部分工作，梁允能同志参加第三、五章初稿编写的部分工作，傅瑞峰同志编写了附录一初稿。本书由王承书、诸葛福同志任主审，参加审阅工作的还有刘广均、钱皋韵、史训良、钱新、严世杰、黄更生、张作风、过松如、李明峰等同志。杨宝燕同志承担本书的描图工作。

在本书编写过程中，王承书教授始终给予热情的支持，并对本书提出很多宝贵意见。原子能出版社张立均同志在本书的编写，审定过程中提出了很多有益的建议。核工业部教

育司对本书的审定，出版工作给予不少帮助。编者愿趁此机会向他们以及其他参加本书审定工作的同志表示衷心的感谢。

由于编者学识有限，教学经验不足，加之编写时间仓促，谬误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

一九八六年二月

引 言

离心法是人类很早就发现的一种分离不同分子量物质的方法。但是，研究离心法分离气体同位素，尤其是铀同位素，只有近五十年的历史。为了使离心法能用于生产，经过多年努力，技术上出现了几次重大的突破，主要有：利用逆向环流产生倍增效应，满足工业要求的低能耗，长寿命、超临界型齐佩型离心机的研制成功和高强度转子新材料的出现等。目前，离心法已成为一种工业规模生产浓缩铀的新方法，在理论和实践两方面都有了很大进展。

离心法研究中的理论工作基本上可以分为机械和物理两个方面。机械方面主要包括转子材料和强度、转子振动和运动稳定性、离心机各部件的设计等内容；物理方面主要包括转子内部的流场分析、离心机分离性能分析等内容，统称为分离理论。本书中阐述的是分离理论部分，第一章为方法概述和基本概念，第二、三章为分离效应和分离功率，第四章为流体动力学，第五章为分离性能参数的优化方法，附录部分介绍了一些近代比较复杂的流体动力学理论。

目 录

引言.....	5
第一章 概论	1
§ 1-1 离心法的发展简况及其特点.....	1
一、离心法发展史	1
二、气体离心机的分类	4
三、两种典型的逆流离心机	7
四、离心法的主要特点	11
§ 1-2 离心力场中气体的压强分布和径向分离 效应	18
一、离心力场中气体的压强分布	18
二、双组分气体的丰度和分离系数	22
三、离心力场中的径向分离系数	26
§ 1-3 逆流离心机的倍增效应	31
§ 1-4 逆流离心机的环流驱动方式.....	35
一、外部驱动环流	35
二、内部驱动环流	36
第二章 离心机的分离效应	41
§ 2-1 离心机的主要特征量和分离参数.....	41
§ 2-2 离心机中的气体扩散流	44
一、双组分气体中的扩散流及其表达式	44
二、扩散流和同位素分离效应	46
三、离心机中的气体扩散流	48
§ 2-3 离心机丰度方程	50

一、丰度偏微分方程	50
二、丰度方程的边界条件	54
§ 2-4 求解丰度方程的径向平均方法	56
一、丰度方程的积分形式	56
二、径向平均方法的基本假设和丰度方程	61
三、柯恩丰度方程	64
四、全回流情况下的分离效应	68
五、供取料情况下的分离效应	72
§ 2-5 求解丰度方程的径向平均方法的改进	83
一、径向分层平均方法	84
二、低丰度情况下的改进径向平均方法	85
§ 2-6 求解丰度方程的数值计算方法	91
一、数值计算方法简述	91
二、计算结果介绍	99
第三章 离心机的分离功率和分离效率	105
§ 3-1 价值函数和分离功率	106
§ 3-2 分离功率的表达式	112
一、分离功率的统一表达式	112
二、各种情况下的分离功率表达式	114
§ 3-3 离心机的分离功率	119
一、分离功率密度	120
二、离心机的理论最大分离功率	124
三、离心机的分离功率	127
§ 3-4 离心机的分离效率	132
一、离心机的当地分离效率	132
二、离心机的截面分离效率	132
三、离心机的分离效率	139
第四章 离心机流体动力学	143
§ 4-1 离心机的流动特性	143

一、离心机流场特点概述	143
二、表征离心机流动特性的参量	146
三、两种典型的流型分布	148
§ 4-2 离心机流体动力学基本方程和求解方法 概 述	152
一、运动基本方程的普遍形式	152
二、等温刚体旋转状态下的平衡解	163
三、线性化运动基本方程	164
四、基本方程的边界条件	166
五、求解运动基本方程的方法概述	169
§ 4-3 离心机流动特性的简化计算方法	175
一、简化计算方法的特点和发展简况	175
二、单纯轴向流型的线性化运动基本方程	176
三、高圆周速度离心机单纯轴向流型的近似解	178
四、各种简化计算方法的结果比较	190
§ 4-4 离心机流动特性的边界层计算方法	194
一、边界层方法的运动基本方程	195
二、离心机流场的分区情况	198
第五章 离心机分离性能参数的优化	211
§ 5-1 离心机的分离性能参数优化问题	211
§ 5-2 简化情况下的离心机分离性能参数优化	213
§ 5-3 一般情况下的离心机分离性能参数优化	221
附录一 匹配渐近展开法求解离心机流场	230
§ A-1 匹配渐近展开法简介	230
一、正规摄动问题和邦加莱展开	230
二、奇异摄动问题	232
三、匹配渐近展开法	234
§ A-2 匹配渐近展开法求解离心机流场	239

一、埃克曼层	240
二、无粘核心区	245
三、斯图尔森层	248
附录二 用积分形式运动方程计算离心机流动特性	260
参考文献	265
主要符号表	266

第一章 概 论

离心法分离铀同位素的研究工作已有近五十年的历史，在这发展过程中，在机型研制和理论分析方面都有很多重大进展。本章以介绍离心法分离铀同位素的历史发展为主，并结合介绍同位素分离的基本知识和离心法的基本原理，为掌握离心分离理论准备条件。

§ 1-1 离心法的发展简况及其特点

一、离心法发展史

人类很早就发现，利用引力场可以分离不同分子量的物质，并在淘金等技术中应用了这种方法。利用引力场来分离不同分子量的气体也已有近百年的历史。早在1895年，德国的布雷迪什（Bredig）首先利用这种方法分离了混合气体。后来，当发现了元素存在同位素以后，很快就有人提出用引力场来分离气体同位素。1919年，林德曼（Lindemann）和阿斯顿（Aston）指出：若在地面和三万米高空分别对空气取样，则样品中的氦同位素组成将有显著的差别。并认为在实际工作中最有希望的分离方法是采用离心机。在这以后，一些科学家曾试图研制分离同位素的气体离心机，但都未获得成功。直到1934年，美国弗吉尼亚大学学者比姆斯（Beams）首先研制成功了能分离气体同位素的离心机，并实现了氯同位素的分离。至此，用离心机来分离同位素在理论和实

· 1 ·

验上都初步得到了确认。

当采用离心法分离不同分子量的气体时，其分离效应仅取决于两种气体分子量之差，而与气体平均分子量的大小无关。也就是说，离心法不象气体扩散法等一些其它分离方法那样，分离效应会随着气体平均分子量的增大而减小。因此，用离心法来分离重同位素是特别合适的。在第二次世界大战期间，一些国家开始研究生产核武器用的浓缩铀的方法，离心法被公认为是一种有希望的方法。于是，离心法研究工作进入了分离铀同位素的阶段。最先探索用气体离心机来分离铀同位素的是美国，在比姆斯研究工作的基础上，他们改进了离心机，首先实现了铀同位素的分离。此后，他们又根据热扩散等分离方法中提出的多级化原理，成功地研制了利用轴向逆流方式使分离效应得到倍增的逆流离心机，使离心机取得了较好的分离效果。但是，由于工程技术上的原因，无论是单台离心机的分离能力，还是离心机的运行可靠性，都还无法达到工业生产的要求，工作只停留在实验室研究阶段。

五十年代起，离心法分离铀同位素的研究工作集中在离心机机型的研制方面，目的是研制满足工业生产要求的具有一定分离能力的离心机。在这方面作出贡献的主要是德国科学家，其中著名的有在苏联、联邦德国和美国从事研究的齐佩（Zippe）和在波恩大学从事研究的格罗特（Groth）。他们分别研制成了两种不同类型的离心机，在本节后面部分将对它们作专门介绍。其中齐佩研制的离心机最富有创造性，以其简单而独特的结构满足了工业用离心机长寿命低能耗的要求，把离心法研究工作向前推进了一大步，为离心法由实验室研究向生产规模过渡作出了重要贡献。

六十年代中期，由于核电站的迅速发展，对核燃料的需

要量激增，加上齐佩型离心机为工业化生产奠定了基础，离心法研究工作引起了更多国家的重视，并有了很大的发展。研究的领域从单台离心机逐步扩大到级联装置和小型试验工厂。在单机研究方面，为了增加分离能力采用了新的高强度转子材料，使离心机能在更高的圆周速度下运行，同时不断增加转子长度，这些为离心法的工业应用创造了更有利的条件。在这个阶段中，西欧的英国、联邦德国、荷兰三国处于领先地位，它们于1974年分别建成了三座年分离功为二十吨左右的离心试验工厂，成功地生产了低浓铀。

七十年代后期，离心法生产浓缩铀开始进入成熟阶段。离心机性能的不断改进和试验工厂的顺利投产证明了离心法可以在经济性方面与气体扩散法相竞争，成为以工业规模生产浓缩铀的新方法。根据目前各国公布的计划来看，在近期拟建的新浓缩铀工厂中，英国、联邦德国、荷兰、日本等国都选择了离心法。1980年，英国、联邦德国、荷兰三国合作建成了两座年分离功为200t的离心示范工厂。到1985年这两座工厂总的年分离功已扩大到约1500t，计划到八十年代末再把分离能力增加一倍。日本在建成了离心试验工厂以后，于1984年开始建设年分离功为200t的离心示范工厂。美国政府曾于1977年决定本国第四个浓缩工厂采用离心法。此后，他们加强了离心法及有关技术的研究工作，于1983年建成了年分离功为23t的离心示范工厂，并继续进行先进的大型离心机的研究工作。后由于激光分离法的进展和浓缩铀大量过剩等种种原因，于1985年决定停建离心浓缩工厂。

在离心法分离铀同位素的发展过程中，理论工作也占有相当重要的地位。早期在离心分离理论方面作出贡献的有马丁 (Martin)、柯恩 (Cohen) 等人。尤其是美国学者柯恩，

他以热扩散柱的分离理论为基础，最早对各种类型离心机的分离性能进行了比较系统的分析，初步建立了离心法的基本理论。此后，离心分离理论的研究工作不断深入，随着离心法从实验室向工业规模过渡，理论研究工作的广度和深度也有了迅速发展。近年来，有关离心法的研究报告陆续发表，大大扩展和丰富了离心分离理论的内容。

二、气体离心机的分类

分离气体同位素的离心机，在其发展过程中，按照基本工作原理的不同，可以分为蒸发型离心机、同流型离心机和逆流型离心机。现将其工作原理分述如下：

1. 蒸发型离心机

蒸发型离心机是马利康 (Mullikon) 最初设计的，它是一种以不连续的方式工作的离心机，图1.1是它的工作原理图。它的工作过程是这样的：转子是一个中空旋转体，可以围绕它的垂直对称轴线旋转。在进行分离以前先把转子内部抽空，然后充入一定量含有需要分离的同位素的液体。当转子旋转起来并达到其工作转速时，由于离心力的作用，在转子内壁上就形成了一层液膜，液体借助于传给它的蒸发热而得到汽化。在离心机内，除了内壁上的液膜外，充满了需要分离的气体。根据本章第二节中将介绍的离心力场中的径向分离效应，在转子内不同径向位置上，气体内的同位素组成是不同的。相对于充入液体的同位素组成来说，在中心轴线附近轻同位素比例增高，在内壁附近重同位素比例增高。在转子的中心轴线处设置了取料的管轴，它不断地把中心区的气体抽出，抽出的气体中浓缩了轻同位素，而转子内留下的液体中浓缩了重同位素。分离同位素的过程就是这样实现

的。如果取料的速度很慢，这样的分离过程就接近于定常状态，其分离系数可以达到离心机的径向平衡分离系数。比姆斯曾成功地用蒸发型离心机进行了铀同位素分离试验。显然，蒸发型离心机对于连续生产是没有价值的，只是

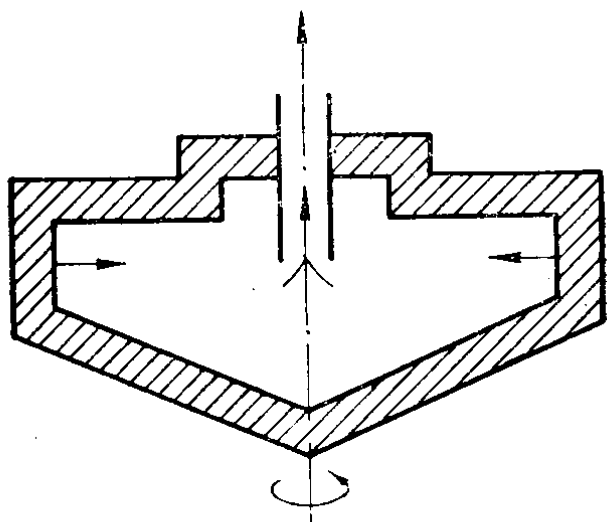


图1.1 蒸发型离心机的工作原理

从历史上来了解离心法分离同位素的发展过程时才有意义。

2. 同流型离心机

同流型离心机是一种在转子内部存在着单方向轴向流动的离心机，图1.2是它的简化流动示意图。在这种离心机中，需要分离的气体通过管轴由一端供入。管轴是双层的，它可以把供料气流分成两股。这两股气流经管轴进入端盖，端盖的结构使这两股气流从端盖上的不同半径处流入转子内，并沿着轴向流向另一端，在转子的另一端被分别抽出。由于离心力场的作用，气体进入转子后，气体中的每种组分在两股流之间产生了质量输运，它与方向相反的普通分子扩散相平衡，最后产生了同位素分离效应。当气体从转子的一端向另一端流动时，内层气流中轻同位素被浓缩，外层气流中重同位素被浓缩。显然，同流型离心机的最大分离系数也只是径向平衡分离系数。这种离心机主要用于实验研究，没有工业应用价值。比姆斯曾用这种类型的离心机进行了铀同位素分离试验，取得了与理论相符合的实验结果。

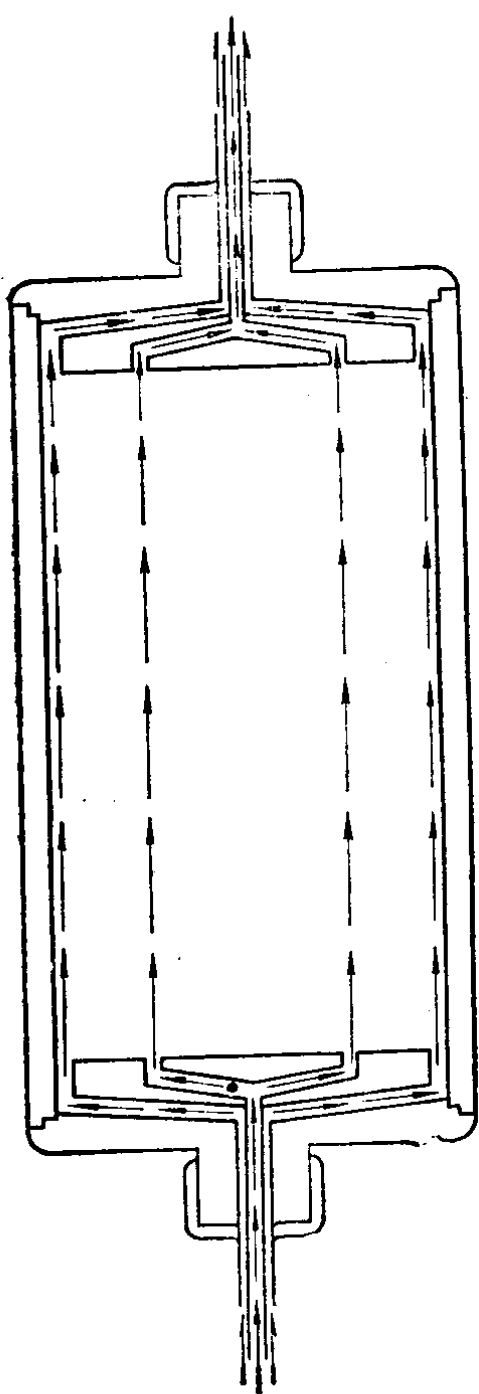


图1.2 同流型离心机的流动示意图

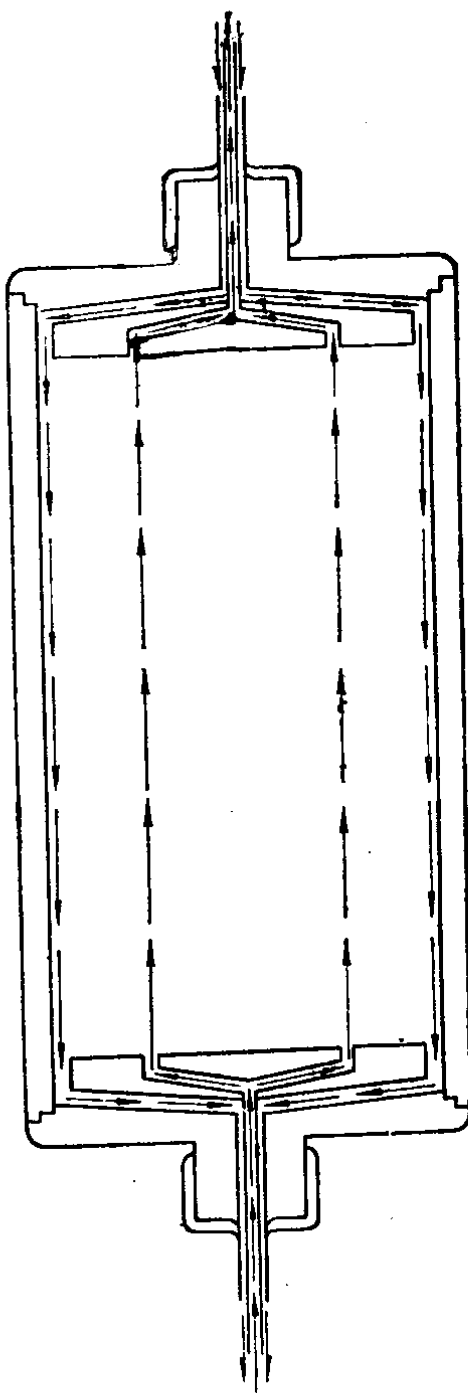


图1.3 逆流型离心机的流动示意图

3. 逆流型离心机

为了改善离心机的分离性能，以化工技术中的精馏塔原理和同位素分离级联理论为基础，根据逆流过程的倍增原理

研制成了逆流型离心机。图1.3是它的简化流动示意图。逆流型离心机的基本结构与同流型离心机相似，只是两股共轴的圆筒状气流沿轴向作相反方向的流动。根据本章 § 1-3 中将要说明的倍增原理，这种逆流方式可以增大离心机的分离系数。在这种离心机中，从转子的一端取出的气流中轻同位素被浓缩，而从另一端取出的气流中重同位素被浓缩。逆流离心机总的浓缩系数可以是径向平衡浓缩系数的许多倍。在其它条件不变的情况下，其倍增效应随着转子长径比的增加而增加。逆流离心机的分离效果好，又能连续操作。因此，它是一种适用于工业生产的离心机机型。逆流倍增原理的提出和逆流离心机的研制成功，在离心法的发展史上具有重要意义。自四十年代起有关离心法的理论和实验研究工作都集中于逆流型离心机，本书介绍的内容主要也是涉及逆流型离心机。

三、两种典型的逆流离心机

为了对逆流离心机的分离特性进行分析，应当对它的结构有所了解。逆流离心机的具体结构形式很多，但它基本上由以下几部分组成，即转子、驱动电机、轴承、阻尼装置、环流驱动装置、供取料装置和外保护套等。下面着重介绍两种在离心法发展史上结构比较典型的离心机，即格罗特型离心机和齐佩型离心机。

1. 格罗特型离心机

这是格罗特等人在波恩大学研制成功的一类逆流离心机。在研制过程中，随着结构和性能的不断改进，试制了几种型号的离心机。其中较完善的是ZG5型离心机，图1.4是它的结构示意图。在这种类型的离心机中，驱动电机设在离心