

[美] S. 威廉尼编 · 原子能出版社

# 铀浓缩



87  
TL25

6

# 铀 浓 缩

[美] S.威廉尼 编

E.W.贝克尔 F.伯朔滕

B.布里高利 R.J.詹森

D.马西格隆 N.纳斯拉斯 供稿

C.P.罗宾逊 S.威廉尼索巴若姆耶

段存华 过松如

译

李正千 李 骏

王承书 李 骏 校

1054/06

原子能出版社

B

358299

## 内 容 简 介

本书是铀同位素分离领域的第一本公开出版的书,内容丰富、新颖,各章的作者都是活跃在该领域的知名学者。全书共分七章:第一、二章,扼要介绍了各种分离方法;第三章,全面系统地介绍了气体扩散法;第四至七章,详细地介绍了离心法、喷嘴法、激光分离法和等离子体分离效应。各章后面还列出了大量的参考文献,为读者提供了方便。

本书是从事铀同位素分离的广大科技工作者和高等院校有关专业的教师、学生的重要参考书。

### Uranium Enrichment

Edited by S. Villani

With contributions by

E. W. Becker F. Boeschoten B. Brigali  
R. J. Jensen D. Massignon N. Nathrath  
C. P. Robinson Soubbaramayer S. Villani  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg

New York 1979

### 铀 浓 缩

段存华 过松如 译

李正千 李 骏

王承书 李 骏 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32·印张11 7/8·字数315千字

1986年8月北京第一版·1986年8月北京第一次印刷

印数1—750·统一书号: 15175·626

定价: 2.65元

## 译 者 的 话

本书是第一本公开出版的有关铀同位素分离的书，内容丰富新颖，各章的作者都是活跃在该领域的知名学者。尽管由于“保密”原因，不得不局限于一些公开发表和已经解密了的内容，作者和编者还是收集和评述了铀同位素分离方面的许多新的科研成果。本书是从事铀同位素分离的科技工作者的一本较好的参考材料。特别是在每章的末尾及全书的末尾都列出了大量的参考文献，为进一步深入探讨、了解这些问题，提供了方便。

本书的不足之处是在写作上有些粗糙：一些地方有错误，一些地方尚欠严谨。在译校中，我们作了修改。由于水平所限，疏漏之处在所难免，望读者批评指正。

本书由段存华译第二、四章，过松如译第三章前半部分，李正千译第三章后半部分，李骏译前言、第一、五一七章。

## 前 言

由于铀的同位素 $^{235}\text{U}$ 具有易裂变的性质，因此它成为核电站燃料的重要组成部分。大多数动力堆都使用加浓铀。但动力堆所用的 $^{235}\text{U}$ 丰度只需百分之几，而 $^{235}\text{U}$ 丰度很高的铀主要用于核武器方面。

尽管目前铀浓缩技术的发展是为了民用，但它明显地与军事目的有关。这就是为什么浓缩铀技术资料大部分是保密的、只有某些方面可以公开发表的原因。

各种分离方法的选择性<sup>1)</sup>强弱不同。高的选择性对建厂在经济性上并不一定是最好的。相反，某些选择性差一些的方法其投资和动力费用的综合指标很可能反倒好一些。在选择性低的情况下，为达到预期的产品丰度，必须使工作介质经过一连串的浓缩级。单级分离效果小和供料的 $^{235}\text{U}$ 同位素丰度低，使得工厂的规模很大。

运行条件的选择、单级流量的确定和组成工厂的级与级的联结方式要在称之为级联理论的基础上确定，这一理论是最佳化研究的重要工具。

本书试图给出铀同位素分离科学技术在工业应用和实验室研究方面的最新的情况。本书的作者们在保密和专利的限制范围之内尽了最大努力使其完整。

布里高利介绍的级联理论给出各种分离方法的数学处理的基本概念。有关章节包括了理想非对称级联的最初的表达方式。

---

1) 选择性相当于分离系数。——译者注

气体扩散法是目前浓缩铀的主要工业方法，马西格隆全面地介绍了这个方法。除了扩散工厂的一些工业和工程方面的问题，作者还深入地讨论了通过多孔膜的流动及相应的分离效应。

索巴若姆耶的关于离心法方面的章节，主要包括该分离过程的概念和理论方面的内容。事实上，离心机的技术细节是保密的。逆流离心机中的气体流动和分离现象过去已广泛地讨论过，奥兰德 (D.Olander) 于1972年曾在这方面发表过全面的论著，但从那以后，对在旋转场中的流型及边界效应又有了进一步的理解。索巴若姆耶全面地叙述了这方面的最新的研究工作，同时也给出了为得到最大分离功率如何确定离心机参数的方法。

分离喷嘴法目前处于示范阶段，贝克尔介绍了该方法包括物理原理及技术问题两个方面的总的情况。他还扼要地介绍了这一领域进一步的研究方向。

本书最后两章专门介绍了新的铀浓缩方法。罗宾逊和詹森介绍了激光法。这种方法是通过铀原子或分子的选择性光激发而得到分离的。最后，伯朔滕和纳特拉特报告了旋转等离子体分离试验并简单地描述了用离子回旋共振效应分离同位素的某些新概念。无论激光法还是等离子体法当前均处于实验室阶段。

S.威廉尼1979年2月于布鲁塞尔

# 目 录

第一章 分离方法的概述 (作者: S.威廉尼) .....	1
1.1 引言:浓缩铀的供求关系 .....	1
1.2 工业规模工厂及示范性工厂 .....	4
1.2.1 气体扩散法 .....	4
1.2.2 离心法 .....	7
1.2.3 空气动力学法 .....	9
1.3 新分离方法 .....	10
1.3.1 激光分离法 .....	10
1.3.2 化学交换法 .....	11
1.3.3 电磁法 .....	12
参考文献 .....	12
第二章 级联理论 (作者: B.布里高利) .....	14
2.1 专用名词 .....	15
2.1.1 级联结构和专业术语 .....	15
2.1.2 级的方程 .....	17
2.2 对称级联 .....	19
2.2.1 一般对称级联方程 .....	19
2.2.2 理想对称级联方程 .....	24
2.2.3 矩形对称级联方程 .....	28
2.3 非对称级联 .....	32
2.3.1 理想非对称级联方程 .....	33
2.3.2 理想非对称级联: 无限小情况 .....	37
2.3.3 矩形非对称级联方程 .....	38
2.4 产品价值函数和分离功 .....	39

2.5	平衡时间	43
2.6	阶梯形级联	47
2.6.1	矩形级联最佳化	49
2.6.2	阶梯形级联最佳化	51
2.6.3	贫化段的最佳化	52
	参考文献	54
第三章 气体扩散法 (作者: D.马西格隆)		56
3.1	分离膜	58
3.1.1	分离原理。通过小孔的分子泻流	58
3.1.2	通过多孔膜的气体扩散	61
3.1.3	分子流	68
3.1.4	粘性流	73
3.1.5	一元气体的过渡流	78
3.1.6	二元混合气体的过渡流动	82
3.1.7	吸附及表面流	96
3.1.8	复合膜	101
3.2	分离级	104
3.2.1	级的参变量	105
3.2.2	混合效率	108
3.2.3	分离器的效率	116
3.2.4	级的特性	122
3.2.5	多元混合物	130
3.2.6	级的设计	131
3.3	六氟化铀的性质	135
3.3.1	物理性质	135
3.3.2	化学性质	140
3.4	气体扩散技术	141
3.4.1	膜的设计	142
3.4.2	膜试验	144
3.4.3	压缩机	148
3.4.4	工厂其它部件	151



3.4.5	工厂运行控制 .....	156
3.5	气体扩散工厂的经济性和设计 .....	15
3.5.1	工厂设计最佳化 .....	160
3.5.2	产品成本 .....	168
3.5.3	工厂的灵活性 .....	1789
3.5.4	分离能力的增加 .....	181
3.6	生产工厂 .....	185
3.6.1	美国正在运行的工厂 .....	185
3.6.2	美国扩散工厂的改进: 级联改进计划和级联提高 功率计划 .....	190
3.6.3	美国新建工厂计划: “扩建”和“新建”工厂 .....	193
3.6.4	法国扩散工厂 .....	196
3.6.5	其它气体扩散工厂和计划 .....	198
3.6.6	气体扩散工艺的前景 .....	199
	参考文献 .....	202
第四章	离心法 (作者: 索巴若姆耶) .....	215
4.1	基本原理和概述 .....	216
4.1.1	基本分离系数 .....	216
4.1.2	用逆流倍增基本分离效应: 驱动方式及叠加原理 .....	218
4.1.3	本章范围 .....	221
4.2	流体动力学 .....	222
4.2.1	运动方程 .....	222
4.2.2	线性化和用匹配渐近展开法求解 .....	225
	简评 .....	225
	运动方程的线性化 .....	226
	边界条件 .....	227
	求解方法 .....	230
4.2.3	流的数值分析 .....	240
4.2.4	结论 .....	243
4.3	分离理论 .....	249
4.3.1	扩散方程和边界条件 .....	249

4.3.2	用径向平均法的科恩解	251
4.3.3	径向平均法推广到轴向变化的流动	258
4.3.4	离心机的可控变量及其最佳化	262
4.3.5	二维扩散方程的数值解	267
4.4	结论	270
	符号表	273
	附录：用本征函数展开法求解线性流体动力学方程组	277
	参考文献	280
第五章	喷嘴法（作者：E.W.贝克尔）	283
5.1	概况	283
5.2	基本原理	286
5.2.1	分离效应的理论描述	286
5.2.2	最佳运行条件	289
5.2.3	级联中 $UF_6$ 浓度的稳定	291
5.3	喷嘴法的商业应用	293
5.3.1	分离元件的制造	294
5.3.2	分离级	296
5.3.3	级联设计和 $UF_6$ 再循环	300
5.3.4	级联运行	303
5.3.5	经济性	304
5.4	发展前景	304
	参考文献	308
第六章	激光法分离铀同位素（作者： C.P.罗宾逊和R.J.詹森）	310
6.1	情况介绍和历史回顾	310
6.2	激光的特性	314
6.3	原子蒸气法	317
6.3.1	供料的制备	318
6.3.2	原子源	318
6.3.3	电离	320

6.3.4	提取	320
6.3.5	原子法所用的激光器	321
6.4	分子法	322
6.4.1	供料的制备	323
6.4.2	光谱学	324
6.4.3	激光诱导光化学	326
6.4.4	收集	327
6.4.5	对激光器的要求	328
6.5	经济性	328
6.5.1	级联	328
6.5.2	投资	329
6.5.3	功率和运行费用	330
6.5.4	厂址选择	331
	参考文献	331

## 第七章 等离子体分离效应 (作者:

	F.伯朔滕和N.纳斯拉斯)	335
7.1	直流工作的原理: 旋转电弧	336
7.2	中等压力, 环状阳极电弧	337
7.2.1	理论考虑	338
	等离子体旋转	338
	压力分布	339
	分离系数	340
	分离功	342
	能量消耗	343
7.2.2	稀有气体电弧的实验	343
7.2.3	铀电弧实验	347
	铀金属电弧	347
	UF <sub>6</sub> 电弧	349
7.3	低压中空阴极电弧	349
7.3.1	等离子体描述	351
7.3.2	分离效应	354

7.3.3 被等离子体加速的中性粒子的分离 .....	355
7.4 其它运行方式 .....	356
7.4.1 交流运行 .....	356
离子回旋共振 .....	357
磁压缩 .....	358
7.4.2 脉冲运行 .....	358
7.5 结论 .....	359
符号表 .....	361
参考文献 .....	362

# 第一章 分离方法的概述

威廉尼 (S. Villani)

## 1.1 引言：浓缩铀的供求关系

就在几年以前，浓缩铀的供求关系计划还都表明，如果不增加新的生产能力，将来浓缩铀的供应有可能要短缺，但目前这种情况已缓和多了。

实际上，建设新的浓缩工厂的计划进展得比较顺利，而在一些国家里核电站的建设速度却显著地放慢了。这主要是普遍的经济衰退致使要求动力增加的速度变慢，以及运用核能源引起的环境及政治上的旷日持久的争论所造成的。

虽然对浓缩铀的需求不如以前那样急迫，但仍存在着用增加新生产能力以满足日益增长的对浓缩铀的需求的问题。由于现在有更长的时间来制定新的生产计划，就可以考虑用新技术代替经典的扩散技术。这一事实促进了一些国家的研究和发展工作，目的是能及时地为建设新的分离工厂提供多种浓缩方法。

尽管铀浓缩本身有保密性质，但近年来，以分离为主题的会议和讨论还是相当多的，这说明人们对同位素分离技术重新产生了兴趣。

如上所述，除了少数例外，近年来建设核电站的计划在世界各地都在不断缩减。

对于西欧共同体九国，按一些最新估计，到1985年预计装机核电将由1974年石油危机后估计的1.75亿千瓦逐步降至0.74亿

千瓦<sup>[1.12]</sup>。

在其它一些发展核动力的主要国家，如美国、日本、加拿大和西班牙，虽然核电发展计划的变化不如西欧共同体的那么大，但也有类似的动向。以上四国加上欧洲共同体九国的核动力到1985年预计将占当时世界核电总功率的80%（百分比此后将下降）。到1990年为止的核动力的装机容量示于表1.1。

除了加拿大核动力计划依赖于天然铀循环外，所有其它国家新增加的核动力将几乎全部基于使用浓缩铀的轻水堆。在2000年以前，快堆进入动力系统的可能性基本上可以不予考虑。

**表1.1 核动力发展的前景（单位：百万千瓦）**

装 机 国 家	1980年	1985年	1990年
西欧共同体	43	74	124
其余西欧国家	20	30	48
美 国	60	113	177
日 本	14	25	49
其余西方国家	10	30	71
西方国家总计	147	272	469

表1.1表示的装机容量只有很小部分是使用天然铀的。实际上，到1985年的2.72亿千瓦中大约只有0.3亿千瓦是使用天然铀的，这主要是由于加拿大重水反应堆的发展，因为普通石墨气冷堆电站已稳定在约800万千瓦总量上。

使用浓缩铀的商用动力堆目前主要有三种：压水堆（PWR）、沸水堆（BWR）和先进气冷堆（AGR）。先进气冷堆对总功率的贡献在欧洲是相当小的，在世界范围内更是微不足道的。至于压水堆和沸水堆，目前在总的核动力中所占的比例约为3比1。

表1.2给出压水堆和沸水堆的最新设计堆型所需要的铀分离功及<sup>235</sup>U燃料丰度。这里假设铀浓缩工厂尾料丰度为0.25%；核电站的负荷因子为80%；不考虑燃料再循环。

表1.2 轻水堆的分离功及<sup>235</sup>U丰度

反应堆类型	压水堆	沸水堆
初装料		
分离功[kg/MWe]	227	230
<sup>235</sup> U丰度[%] (一般范围)	1.9—3.3	1.7—2.7
换料		
分离功[kg/MWe·a]	109	100
<sup>235</sup> U丰度[%]	3.2	2.75

在表1.2数据的基础上，可以估计满足表1.1所预计的全世界核电装机容量所需的分离功。然而为了估计得更准确，应该考虑到反应堆设计的改进。也就是说表1.2所表示的数据对不同时间开始运行的反应堆略有不同。

根据目前数据<sup>[1,2]</sup>，将所需要的分离能力的估算以圆整后的数据综合于表1.3内。

虽然离心法会逐渐起更大的作用，其它方法（诸如利用气体动力学分离效应的方法）也可能会达到工业应用阶段，但从现在起到1990年期间赖以满足分离功要求的铀浓缩工厂主要还是气体扩散厂。

表1.3 预计西方国家所需要的年分离能力（单位：千吨分离功）

年    代	1980	1985	1990
西欧共同体	5	10	15—23
其余西欧国家	2	4	6—9
美    国	9	17.5	26—34.5
日    本	2	4	6.5—7.5
其余西方国家	1	2.5	4.5—8
西方国家总计	19	38	58—82

表1.4为预计的西方国家的浓缩能力。

由表1.3、1.4的数字，可以看到在所考虑的时期内，现有的或计划中的浓缩能力应能满足需要。在此时间区间里的前几年生产过剩的存货可供在年需要量大于年生产能力时调剂使用，以满足该阶段的需要。

**表1.4 西方国家浓缩能力 (千吨分离功/年)**

年 代	1980	1985	1990
欧洲			
扩散法	4.5	10.8	10.8—21.6
离心法	0.4	2.0	3.5—7.5
美国			
扩散法	24.6	27.3	27.3
离心法	/	/	8.8
日本			
离心法	/	0.1	1.0—6.0
其它西方国家			
离心法和空气动力学法	/	0.5	2.5—7.5
西方世界总和	29.5	40.7	53.9—78.7

## 1.2 工业规模工厂及示范性工厂

### 1.2.1 气体扩散法

目前只有气体扩散法已达到商业成熟阶段，其它方法诸如离心法和分离喷嘴法，只是已进入或正在进入示范工厂阶段。

表1.5给出了当前及拟议中的各国气体扩散法分离能力。西方国家当前运行中的扩散厂总能力占各种分离方法总能力的98%。到1985年将下降到95%。

公开的气体扩散法的资料是很少的，特别是像分离膜工艺这



类关键性领域。能找到的公开发表的关于分离膜的性能实验数据只有相当老的文献。当然也有些例外情况，如日本于1977年在萨尔斯堡发表的镍、氧化铝和聚四氟乙烯膜的效率和渗透值数据<sup>[1,3]</sup>。

然而根据关于美国和法国扩散方法发展的一般评论，可以看到自1945年美国橡树岭第一个扩散级联和1967年法国皮埃尔拉特扩散厂分别运行以来，扩散方法已有很大改进，这包括效率更高的分离膜的发展和扩散机部件及工厂设计的改进。

**表 1.5 西方国家运行中及在建的气体扩散厂**

厂 址	生产能力 (千吨分离功/年)	状 况
美国		
橡树岭、帕杜卡、朴茨茅斯	17.2	目前欠载运行 1974—1985年逐步完成改造
以上三厂改进及提高	10.1	
美国总计	27.3	
法国		
皮埃尔拉特	0.4—0.6*	运行中
特里卡斯坦	10.8	在建, 1981年投入使用
英国		
卡彭赫斯特	0.4—0.6*	运行中

\* 为文献中查到的估计数字。

新膜可以在较高压力和较大流量下运行而分离效率仍保持在适当的水平。据报道<sup>[1,4]</sup>，目前装在美国扩散厂中的新膜的生产能力约是开始时装的膜的23倍。气体压力约是开始设计值的9倍时，膜的效率仍令人满意。

现代扩散厂设计在高于一个大气压下运行。这样做有明显的好处。看来分离膜还有进一步改进的潜力。在这一点上美国和法国的看法是一致的。

作为扩散级的主要部件，无论分离器还是压缩机都有很大的改进。在新设计的工厂里标准级的分离器比较大，以便安装较大面积的膜；将热交换器装在低压管路上而不是按老的设计装在高压管路上。很早以前就有人指出过这种作法的优点（由于高的工