

气体离心法的技术基础



《国外原子能消息》编辑组

一九七五年十月

说 明

本文系 Donald R.Olander, "Technical Basis of the Gas Centrifuge", *Advances in Nuclear Science and Technology*, Vol.6, P.105—P.174的译文, 内容是根据扩散方程和流体动力学方程, 分析气体离心机的性能。

由于水平的限制, 难免有错误之处, 欢迎读者批评、指正。

翻译过程中得到了有关单位和同志的热情帮助, 特表示感谢。

译者

一九七五年十月

目 录

一、引言	(1)
(一) 经济上的吸引力	(1)
(二) 讨论范围	(2)
(三) 离心机的分离特性	(7)
(四) 理想级联	(10)
二、气体离心机的分离特性	(13)
(一) 组分连续性方程	(13)
(二) 分子扩散的基本动力学理论	(15)
(三) 离心力场中的平衡分布	(17)
(四) 压力扩散流量	(20)
(五) 逆流离心机的基本偏微分方程	(21)
(六) 轴向浓缩方程	(23)
(七) 全回流下的浓缩	(30)
(八) 供料流量对浓缩的影响	(33)
(九) 供料时微弱分离的 α 近似解	(36)
(十) 离心机的最佳分离功	(38)
(十一) 小结	(41)
三、流体动力学	(42)
(一) 分离分析所需的流动特性	(42)
(二) 最佳流量函数	(43)
(三) 运动方程	(46)
(四) 长圆筒解	(51)
(五) 求解热驱动逆流离心机中的流量	

绝对值.....	(63)
四、结论.....	(75)
附录：离心机最大分离功的流体动力学推导.....	(76)
符号.....	(80)
参考文献.....	(84)

一、引 言

(一) 经济上的吸引力

气体离心机或超速离心机是利用比重力约大十万倍的离心力场的作用来分离铀同位素的装置。第二次世界大战期间，曾广泛地研究过不同类型的超速离心机，作为分离铀同位素（用于制造核武器）的一种可能方法。后来，美国由于决定采用气体扩散法生产加浓铀，因而对离心法的兴趣大大降低。因为对气体扩散法在设备和研究方面已投入大量资金，所以，美国在规划未来核反应堆对加浓铀的需求时，还没有认真考虑采用离心法。

然而，西欧和日本由于缺少气体扩散能力，随着核反应堆装机容量的迅速增长，越来越希望采用离心法作为生产核动力工业所需的低浓铀的主要方法。离心法对这些国家最有吸引力的特性也许是耗电较少。美国三座气体扩散工厂满负荷运行时，耗电量相当于西德总发电量的三分之一。初步估计表明，离心法的电力费用约占分离功成本的10%，而扩散法达50%。西欧电力价格比美国高，因而更希望采用比扩散法耗电少的同位素分离方法。另外，比气体扩散工厂最佳规模小得多的离心浓缩工厂就能够经济地运行。

再则，因为气体离心机的性能与机械可靠性关键取决于它的尺寸，所以，离心浓缩工厂扩大规模不是简单地靠增加

单个分离单元的尺寸。满足西欧加浓铀需求的离心浓缩工厂可能需用几百万台离心机，而每台离心机的转速超过50000转/分，所以离心机的可靠性与寿命（对生产成本的影响极大）只能通过工厂规模的论证来回答。然而，离心法是很有希望的一种方法，这就促使英国、荷兰和西德三国政府共同组建一个公司，发展离心法，使之达到商用阶段。^(1,2)

（二）讨论范围

应用离心法分离铀同位素涉及很多方面问题。上述的经济与技术问题本文不准备再进一步阐述。有关经济与政治方面的考虑，可参考下列文献：Barnaby⁽³⁾、FORATOM Study⁽⁴⁾、Bogaardt 和 Theyse⁽⁵⁾、Kistemaker 等⁽⁶⁾、Becker⁽⁷⁾、Bourgain⁽⁸⁾。有关旋转圆筒设计、机械稳定性、材料选择等工程问题，可参考下列文献：Groth⁽⁹⁾、Beyerle 和 Groth⁽¹⁰⁾、Groth 等⁽¹¹⁾、Groth 和 Welge⁽¹²⁾、Barker⁽¹³⁾、Martin⁽¹⁴⁾、Zippe⁽¹⁵⁾ 及 Shacter 等⁽¹⁶⁾。

本文主要根据扩散方程和流体动力学方程，分析气体离心机的性能，这些方程支配着气体离心机中出现的各种现象。此外，仅将讨论一种特殊类型的气体离心机。在曼哈顿计划期间，曾研究过三种离心机：蒸发离心机、同流离心机和逆流离心机。这里只讨论逆流离心机，只有这种离心机可考虑大规模应用，主要因为其中逆流循环的流型使单级分离效应重复多次，因而单台离心机的分离系数高。每台逆流离心机的作用就如同一个小型同位素分离级联。

在离心机旋转圆筒中建立逆流循环有两种不同的方法，分别如图 1 和图 2 所示。在 Beams⁽¹⁷⁾ 离心机中（图 1），依

靠从两端两个不同半径的部位输入气体而形成逆流。回流与正流依靠离心机外部的泵来维持，因此可以说逆流是外加的。另一种方法是用热或机械方法在离心机内部维持逆流。

图 2 a 为 Groth⁽⁸⁾ 的 ZG 3 型离心机。这种离心机中，使顶部端板的温度比底部端板的温度稍高些，形成热对流，从而形成逆流。大部分气体处在温度相当于两端板的平均温度之下。这种类型的逆流离心机称为热驱动逆流离心机。

内部逆流也可以用机械方法形成，而不需要在两端板之间维持温差。1958 年~1960 年期间，Zippe⁽¹⁵⁾ 曾在 Virginia 大学制造并试验了这种机械驱动内部逆流离心机。Zippe 及其同事在四十年代末和五十年代初，在苏联就已经发展了这种设计。图 2 b 为 Zippe 离心机旋转圆筒的简图。同 Groth 离心机相似，供料从旋转圆筒中央的转轴上某个部位输入。逆流是靠旋转气体同顶部取料器的相互作用而形成的。底部取料器的正上方装了一块挡板，以防止取料器对内部气流产生干扰。这些取料器还像垂直于转轴的平面内的小皮托管一样（见图 2 b 的插图），从离心机中抽取精料和贫料。由于静止取料器利用了驱动旋转圆筒的部分能量，像泵一样输运工作气体，因此，Zippe 认为不需要使用外部泵来输运级联各级之间的工作气体。

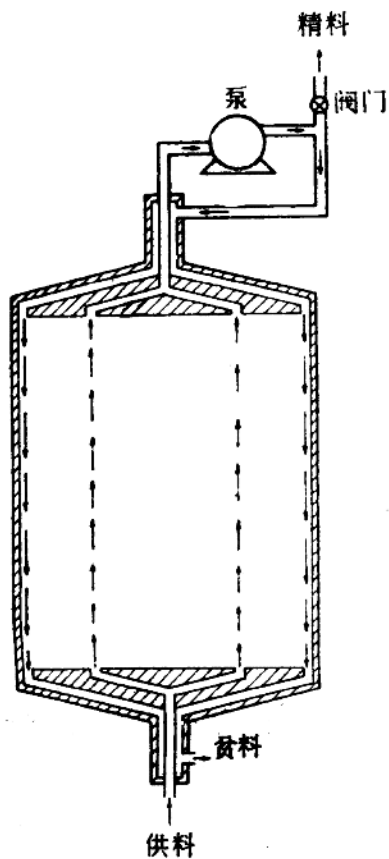


图1 外部维持逆流的气体离心机, Beams (17)

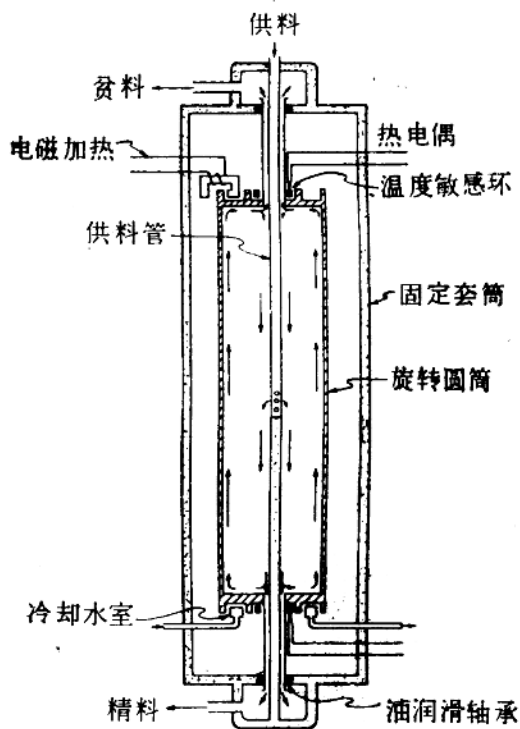


图 2a 热驱动逆流离心机, Groth⁽⁹⁾

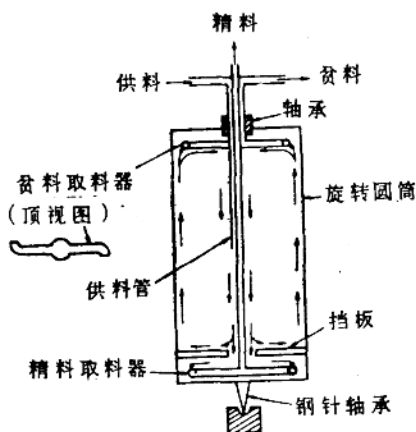


图 2b 机械驱动逆流离心机, Zippe⁽¹⁵⁾

上述两种内部驱动逆流离心机中，供料均从转轴上的小管道输入旋转圆筒。为避免浓度不同的气流相互混合（这是所有同位素分离方法必须注意的），转轴上供料点应选择在供料浓度与离心机中由离心作用与轴向环流作用共同形成的气体浓度相同的部位上。在这类离心机中，环流流量（用上行流量与下行流量之和表示）能够单独调节而不受供料流量的影响，而且简单地调节内部温度或取料器-挡板设计就能对“回流比”加以选择，这种机动性是图 1 那种用外部泵来产生逆流的离心机所没有的。现在，只考虑将内部驱动逆流离心机应用于大规模分离铀同位素，尽管还不了解究竟是热驱动逆流还是机械驱动逆流更好些。本文只讨论内部驱动逆

流离心机。

气体离心机可采用两种不同的方法进行分析：（1）流体动力学分析，决定旋转圆筒内气流的性质和大小；（2）分离分析，确定离心机起同位素分离装置作用的机理。

虽然分离特性取决于离心机的流体动力学，但是，假定流型是已知的，通过对分离过程的分析，亦可对分离特性取得相当的了解。按此程序给出流体动力学特性，后者对于了解离心机分离同位素的能力是很重要的。流体动力学分析只考虑单组分气体的状况，而分离分析考虑两种同位素的混合气体。本文第二节研究分离性能，第三节研究流体动力学问题。

（三）离心机的分离特性

由分离分析得到两个参数：单台离心机的分离系数（或单级分离系数） α 和分离功 δU 。这两个特性与离心机的设计性能、工作气体（六氟化铀）的物化性质、流型及可控变量（如供料流量和分流比）有关。

把单台离心机当作一个分离单元，就能最好地表明分离系数和分离功的重要性。分离单元具有一些标准特性，根据这些特性可以衡量它作为同位素分离装置的有效性。图3示出这样的分离单元，每个分离单元输入浓度为 x_F 、流量为 L 的供料，输出浓度为 x_P 、流量为 P 的精料（或头部流）和浓度为 x_W 、流量为 W 的贫料（或尾部流）。分离单元的分流比定义为：

$$\theta = P/L \quad (1)$$

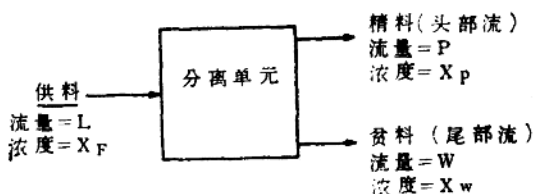


图 3 单个分离单元

根据所需同位素在该分离单元中的物料平衡（同位素的克分子分数用 x 表示），得出

$$x_F = \theta x_P + (1 - \theta) x_W \quad (2)$$

分离系数定义为：

$$\alpha = \frac{x_P / (1 - x_P)}{x_W / (1 - x_W)} \quad (3)$$

用方程（3）来定义分离系数时，分离系数与浓度无关，而取决于供料流量 L 和分流比 θ 。希望 α 的值比较大，但这并不是分离单元唯一重要的特性。例如，一个特定装置只在很小的供料流量时才能得到大的分离系数。即使 α 较大，但为处理一定流量的供料，则需用大量的分离单元。因此，从级联设计观点来看，宁愿使用分离系数适中但能在相当大的供料流量下工作的分离单元。

定性说来，分离单元的分离功可表征分离单元的有效性对供料流量和浓缩度的依赖关系。为描述分离单元的这一特性，可以把分离单元对所处理的流体做的功看做是增加了物料的“价值”。同位素浓度为 x 的单位数量物料其价值用 $V(x)$ 表示，称为价值函数（由 Peierls 和 Dirac 提出的）。

分离单元的分离功定义为该分离单元输出流相对输入流的价值增加。用类似物料平衡的方法来建立“价值平衡”。对于图3所示的分离单元，价值平衡为：

$$\delta U = \theta LV(x_p) + (1-\theta) LV(x_w) - LV(x_F) \quad (4)$$

根据 δU 与输出流和输入流的同位素浓度无关这一要求，就能确定分离功 δU 和价值函数 $V(x)$ 的形式。如果只考虑“微弱分离”的情况，下面的分析就大大简化（对我们的要求来讲，仍相当精确）。所谓“微弱分离”是指每个分离单元的基本效应很小，即其输出流与输入流的浓度虽然不同，但彼此差别很小。只要分离系数接近于1，就能满足这个条件。在微弱分离的情况下，价值函数 $V(x_p)$ 和 $V(x_w)$ 可由相对供料浓度的台劳级数展开式求得：

$$\begin{aligned} V(x_p) = V(x_F) &+ \left(\frac{dV}{dx} \right) (x_p - x_F) \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{d^2V}{dx^2} \right) (x_p - x_F)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

对于 $V(x_w)$ ，类似于方程(5)。

将方程(2)和方程(5)代入方程(4)即得

$$\delta U = \frac{1}{2} L \theta (1-\theta) (x_p - x_w)^2 \left(\frac{d^2V}{dx^2} \right) \quad (6)$$

对于微弱分离的情况， $\alpha - 1$ 与1相比可忽略不计，则定义分离系数的方程(3)可简化为：

$$x_p - x_w = (\alpha - 1) x (1 - x) \quad (7)$$

因为分离单元的输入、输出三股气流的浓度彼此相近，所以方程(7)右边无论用 x_F 、 x_w 或 x_p 哪一个作为浓度变量是无关紧要的，这里简单地用 x 表示。

将上面两个方程组合起来，即得

$$\delta U = \frac{1}{2} \theta (1 - \theta) (\alpha - 1)^2 L [x(1-x)]^2 (d^2 V / dx^2) \quad (8)$$

为满足 δU 与浓度无关的条件，则必须令

$$d^2 V / dx^2 = 1 / [x(1-x)]^2 \quad (9)$$

方程 (9) 能够直接进行积分。如采用辅助的规定 $V(0.5) = (dV/dx)_{0.5} = 0$ (选择此规定是为了方便起见，并不影响价值函数的基本性质)，则积分求得：

$$V(x) = (2x - 1) \ln [x / (1 - x)] \quad (10)$$

于是与浓度无关的分离单元的分离功为：

$$\delta U = \frac{1}{2} \theta (1 - \theta) (\alpha - 1)^2 L \quad (11)$$

(四) 理想级联

大规模同位素分离工厂由大量分离单元构成如图 4 所示的理想级联 (或无混合级联)。级联输入流及输出流的流量与同位素浓度分别用斜体字母与 X 表示，以区别于单个分离单元的情况。

Cohen⁽¹⁸⁾ 的书中介绍了理想级联的特性 (不管组成该级联的分离单元的特性如何)。级联的高度 (从贫料端至精料端) 正比于为达到所需分离而需用的级数。如果分离系数接近于 1，从而与浓度无关 (微弱分离)，则级联的总级数为

$$\text{级数} = \left(\frac{2}{\alpha - 1} \right) \ln \left[\frac{X_D / (1 - X_D)}{X_W / (1 - X_W)} \right]^* \quad (12)$$

*此式已假定 $\theta = \frac{1}{2}$ ，即平分流条件。——译者注

每级可用图中的一条水平线表示。在任一级处级联的宽度是该特定位置处分离单元数目的量度。任一级中所有的分离单元输入相同浓度的供料，输出相同浓度精料（头部流）和贫料（尾部流）。图 4 所包括的总面积正比于级联中分离单元的总数。分离单元以分流比 θ^* 工作时，在微弱分离情况下，理想级联的总级间流量为：

$$J = 2U / (\alpha - 1)^2 \theta (1 - \theta) \quad (13)$$

同方程（4）类似，式中 U 为整个级联的分离功：

$$U = PV(X_P) + WV(X_W) - FV(X_F) \quad (14)$$

用方程（13）除以方程（11），即得 J/L 为

$$J/L = U / \delta U \quad (15)$$

这就是级联中分离单元的总数。 α 和 δU 决定了级联的所有性质。如果把 U 看作是级联的设计要求，则 δU 决定了级联所需用的分离单元数量〔方程（15）〕，分离系数决定了级数〔方程（12）〕。级联的锥度也是由单个分离单元的这两个特性（ α ， δU ）来决定。

希望 α 与 δU 均大些。 δU 越大，级联所用分离单元的数量越少，这显然是有益的。 α 越大，完成总的分离所需的级数越少，则图 4 所示的级联就呈矮胖形。每级由大量的分离单元并联而成，并避免了小 α 级联所必须的许多级间循环。

* 级间连接必须避免不同浓度的气流相互混合。例如 $\theta = 1/3$ 时，头部流必须输入前两级，而不是像 $\theta = 1/2$ 的级联那样输入下一级。

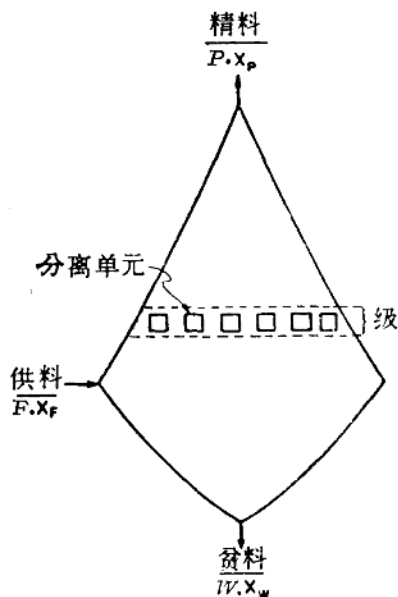


图4 理想级联

所以级联运转问题就是要缩短级联的高度，把分离单元并联起来，而不是串联起来。然而，使级联中分离单元的数量最少也很重要，而且，如果要进行选择的话，则宁愿设计具有最大的 δU ，而不是最大的 α 。

二、气体离心机的分离特性

这一节主要对内部驱动逆流离心机分离两种同位素的气体混合物的分离过程进行理论分析。任务是决定离心机的分离系数 α 和分离功 δU ，并着重求出这些特性与可控参数（如内部流量、供料流量及分流比）的函数关系。

单组分系统中基本守恒方程为质量（整体连续性）、动量和能量守恒方程。在第三节中，将利用这些方程来描述离心机内气体中的流体速度分布。这一节的分析中假设流体速度 v 已知。

（一）组分连续性方程

在由两个组分（现在情况下为两种同位素）组成的流体中，可以应用另外一个守恒方程：“组分连续性方程”，它是描述两组分混合物中一个组分的守恒*。对于 A 与 B 两个组分的混合物，组分 A 的连续性方程为⁽¹⁶⁾：

$$-\frac{\partial C_A}{\partial t} + \nabla \cdot N_A = 0 \quad (16)$$

式中 C_A 是组分 A 的克分子浓度（克分子/厘米³）， ∇ 是梯度算符（或汉弥尔登算符）， N_A 是组分 A 的克分子流量

* 对于二元混合物的两个组分都可以写出组分守恒方程。然而，两个组分守恒方程的总和等于总连续性方程。因此，二元混合物的两个组分连续性方程之中只有一个是独立的。