

YOU TONG WEI SU FEN LI



铀同位素分离

(1975年伦敦会议文集选译)

原子能出版社

铀同位素分离

(1975年伦敦会议文集选译)

徐 芳 等译

郭 臻 审校

原子能出版社

内 容 简 介

本书译自 1975 年 3 月在伦敦召开的铀同位素分离国际会议的《论文集》，内容包括：介绍喷嘴法、激光法、等离子体旋转法和一些其它新方法在铀同位素分离上的运用；论述离心法和气体扩散法工厂的运行经验；分析气体扩散法体系和离心法级联的最佳化；还谈到欧洲扩散计划与铀浓缩公司、离心机技术公司的现状以及商务等等。

本书可供从事铀同位素分离及有关的科技工作者和领导参考，也可供高等院校有关专业的师生参考。

铀 同 位 素 分 离

徐 芳 等译

郭 臻 审校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092¹/₁₆·印张 11¹/₄·字数 264 千字

1980 年 3 月北京第一版·1980 年 3 月北京第一次印刷

印数 001—1680 · 统一书号：15175·208

定价：1.65 元

目 录

喷嘴分离法的物理学性质和发展趋势	(1)
分离喷嘴技术的现状	(8)
喷嘴分离法的工业实现	(14)
红外激光分离铀同位素	(23)
激光同位素分离方法的一些技术情况	(28)
激光分离同位素	(33)
利用铀等离子体的同位素一步分离法	(38)
旋转等离子体的同位素分离	(45)
旋转氙等离子体的同位素分离	(54)
用等离子体离心机分离氙同位素	(61)
论藉助绕轴旋转的等离子体圆柱分离同位素的可能性	(66)
离子交换法浓缩铀的新实验和评论	(72)
除扩散法外的法国铀同位素分离方法的研究	(78)
美国气体扩散厂运行经验	(84)
离心浓缩工厂的运行经验	(92)
欧洲扩散规划实施现状	(101)
URENCO-CENTEC的进展情况及 其 计划	(110)
同位素分离(气体扩散)方面的体系最佳化: 工厂、级联、级的原理和应用	(116)
气体离心机浓缩铀级联的最佳化	(130)
关于新的浓缩铀工厂的方法选择	(139)
浓缩铀的市场、供应和商务	(149)
美国的铀浓缩	(157)
无水氢氟酸中 UF_6 与 UF_6 离子间的化学交换	(170)

喷嘴分离法的物理学性质和发展趋势

贝克尔 (E. W. Becker) 等

在喷嘴分离法中,同位素分离是由六氟化铀气体在快速弯曲流动中离心力依赖于质量而引起的。利用轻的辅助气体,由于加大了流速和在离心场的离析作用下达到同位素之间的区分,从而加强了同位素分离。在具有喷流借助于曲壁偏转的喷嘴分离系统上完成了最佳化工作,对工业规模的工厂,得到了理想的比压缩功和比功率消耗,它们分别为 2700 千瓦小时/分离功单位和 4000 千瓦小时/分离功单位。为论证现时的研究工作,讨论了喷嘴分离系统的一些实验。这种系统是由对向气体喷流在流场中产生弯曲流线的,其磨损损耗很低。由于有关喷嘴分离法的改进工作远远没有完成,所以,可以期待在将来的研究工作中对于此法的经济方面会有重要的改善。

引言

为浓缩轻的铀同位素 U-235,在卡尔斯鲁厄 (Karlsruhe) 核子研究中心发展了喷嘴分离法,作为与气体扩散法和离心法同样可供选择的方法之一^[1-3]。它利用气体 UF_6 在快速弯曲流动中离心力与质量的依赖关系来实现铀同位素的分离。与其它的铀同位素分离法比较,喷嘴法的优点是它把比较简单和可靠的工艺与很高的发展潜力结合起来了。

在这次会议期间,喷嘴分离法将在三个报告中加以讨论。这是第一个报告,它涉及喷嘴分离法的物理学性质,即在喷流被曲壁偏转的一般的喷嘴分离系统的基础上讨论喷嘴里的流动和扩散现象。此外,为了表达这个过程发展潜力的概念,将讨论正在进行研究的关于对向分离喷嘴系统方面的问题。另外两个报告将详细介绍有关喷嘴分离法的工艺资料^[4]和西德煤炭电力公司 (STEAG) 在工业上的实施^[5]。

轻的辅助气体对同位素分离的影响

喷嘴分离法的基本特征可以从图 1 看出。图 1 表示到目前为止在工业规模实现此法时所用的喷嘴分离系统的横截面。气体 UF_6 与轻的辅助气体 (如 He 或 H_2) 混合,沿固定的曲壁膨胀。在偏转流动的末端被分流片分成轻馏份和重馏份。克分子数大大超过 UF_6 的轻的辅助气体使 UF_6 的流速加大,从而增加了对分离起决定作用的离心力。此外,轻的辅助气体对 UF_6 同位素在离心场作用下的沉积产生不同的滞后,它同位素分离上也是一个有利的效应。轻的辅助气体的这些特殊的优点将在下面详细讨论。

在喷嘴分离法的发展工作中,已完成了有关喷嘴里的流动和扩散现象的广泛的研究工作。事实上,目前已知的方法不能给出发生在喷嘴分离流动中的各种效应以完整的理论上的描述,因为流动是在连续状态和自由分子状态之间的这个复杂的过渡范围内。在最佳工作状态范围内,由平均自由程和喷嘴宽度之比所规定的努森 (Knudsen) 流动数近似地为 1/50 到

1/150。此外流动分布的计算大大地被流动过程和扩散过程之间的强相互作用所复杂化，即在 UF_6 和轻的辅助气体之间的很大的分离，明显地影响着流动^[6]。

为此而发展了一种专门的测量技术，

它允许在分离喷嘴里任何一点测定流动状态^[7]。这种技术是利用所谓的自由分子探测器，其特征尺寸远小于平均自由程。这些测量是在放大很大的分离喷嘴模型里完成的，相应地大大降低了气体的密度。为避免用 UF_6 工作而引起的腐蚀问题，通常利用 He 和 SF_6 的混合物。为说明轻的辅助气体的加速作用，图 2 示出了在分离喷嘴的偏转角为 0° 、 90° 和 150° 三种径向截面上(图 1)

所完成的典型的流量测量结果。图中给出了轻组分、重组分和混合气体的速率比(它被定义为流动速度和最可几热速度之比)作为喷嘴曲率半径的函数。在此情况下，重成份的 SF_6 大大地被轻的辅助气体加速。它获得速率比约为 2.8，即它达到大约三倍纯 SF_6 的音速。轻成分以及完全混合气体保持在亚音速状态，而且气体喷流能够实现很大的偏转角而对流动没有严重干扰。所以利用轻的辅助气体允许把高度的超音速流动的 UF_6 偏转到 180° ，从而在分离喷嘴里能够获得对同位素分离来说是

很高的离心力。

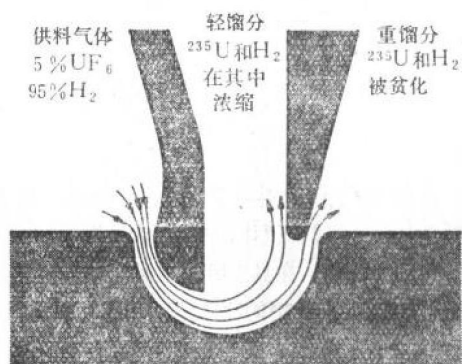


图1 喷嘴分离法到目前为止用于工厂的喷嘴系统的横截面

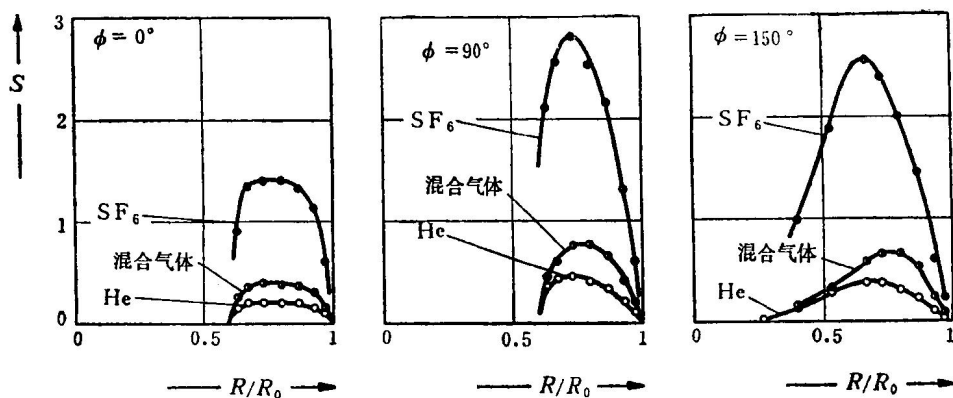


图2 对重组分(SF_6)，轻组分 H_2 和混合气体在偏转角 $\phi = 0^\circ$ 、 90° 和 150° 下，根据自由分子探测器在放大的分离喷嘴模型里测量的结果所确定的速率 S 的径向分布图 (He/SF_6 混合气体—4 摩% SF_6 ，进口压力 $P_0 = 0.4$ 毫米汞柱，膨胀比 $P_0/P_1 = 3$ ， R_0 为偏转壁的曲率半径)

如上所述，轻的辅助气体不单是使重的 UF_6 加速来改善同位素分离。在分离喷嘴里观察到的同位素分离的基本效应可以大大超过在平衡状态分离的情况下对无限大的流速所达到的值。这一点从图 3 可以清楚地看出。图 3 是分离效应作为喷嘴分离的 UF_6 的分流比的函数。平衡状态的分离表征的是这样的状态，在这种状态下分离的压力扩散被浓度梯度引起的相互

混合的通常的扩散所平衡。在这种情况下,在分离喷嘴里甚至对无限大的离心力或无限大的流速,同位素分离效应都不能超过一个确定的极大值,因为当流速增加时 UF_6 被集中在一个越来越窄的薄层里^[8]。虽然在这个层里,浓度梯度按照速度的平方增加,但同时这个层的厚度却按照速度的平方而减小。因此,分离效应在给定的分流比时趋向一个有限的极限值。

对那些高分离效应(超过平衡状态的分离效应)可以作这样的解释,即在流动的离心场中辅助气体对轻的和重的 UF_6 同位素在建立平衡分布上产生不同的滞后^[8]。建立平衡的浓度分布的时间常数对重同位素比较短。所以在流动偏转的一个中间状态,重同位素已经被集中在离心场的外部边界上,而轻同位素仍然更多地均匀地分布在辅助气体里。这个效应见图4。图4是利用与偏转角无关的速度分布对流动偏转过程中分离效应的计算结果。在浓度分布的形成中,分离效应增长到一极大值,而当两种同位素处在大偏转角都建立了平衡状态时,分离效应降到一个极限值。时间常数上的差别被同位素之间的碰撞缩小。所以分离效应将有一个明显的中间加强,特别是在辅助气体中 UF_6 浓度较低的情况下。在同位素之间无碰撞的情况下,能够证明流速为300米/秒时分离效应应为20%。同位素分离极大值的角的位置依赖于扩散过程的时间尺度,即依赖于二元扩散系数和喷嘴的特征尺寸。

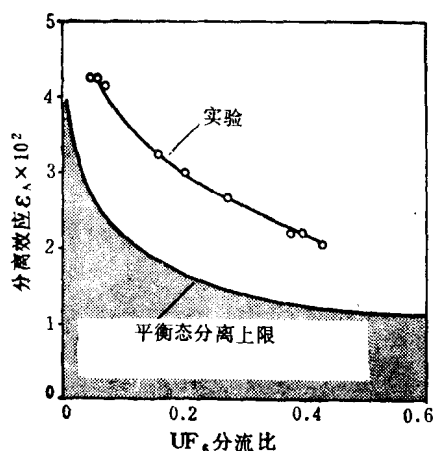


图3 上面的曲线是实验测定的分离效应 ε_A 与 UF_6 分流比 Q (对 UF_6/H_2 混合气体, 1.6% UF_6 , 膨胀比为8) 的关系。下面的曲线是平衡态分离的上限, 它是按无限大流速计算的

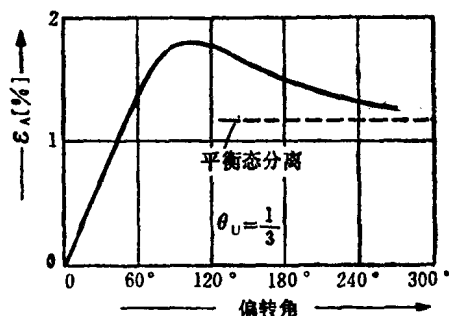


图4 对 H_2/UF_6 混合气体—1.5摩% UF_6 和 UF_6 的分流比 $\theta = 1/3$ 计算出来的同位素分离的基本效应 ε_N 与偏转角 φ 的关系曲线

喷嘴分离系统的最佳化

尽管我们能够满意地描述分离喷嘴里的流动和扩散现象的基本方面,但是分离喷嘴系统的最佳化必须用 UF_6 作大量的实验来解决。在这些研究工作中必须改变许多不能彼此无关地实现最佳化的参数。除进口压力、吸气压力、分流比和 UF_6 的浓度外,还要考虑约10个喷嘴系统的几何参数。为了在一个适当的时间内处理这样广泛的计划,我们安装了一些新的试验设备,它在进行测量的速度方面,较之早先的设备有了很大的改进。图5是为分离实验用的新的试验设备的照片。

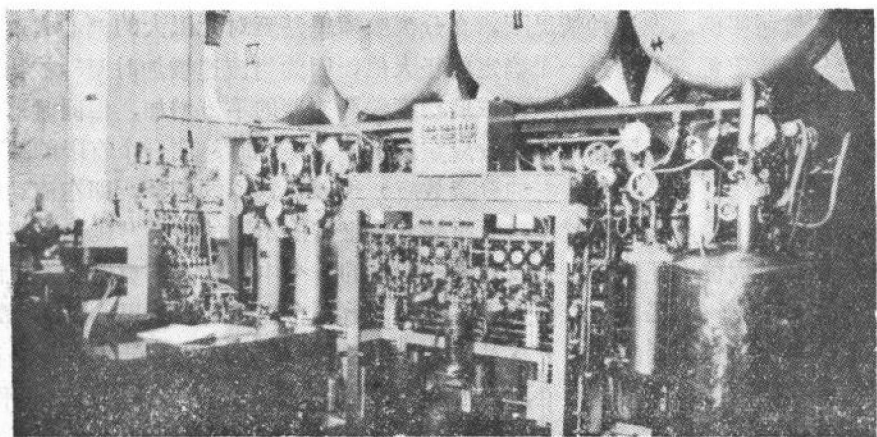


图5 分离实验用的新的试验设备的正视图

图6说明最佳化的程序。对不同的入口压力和膨胀比测定分离效应，所有其它的参数保持不变。从这些结果中确定出一个近似的公式，它很精确地描述分离效应与入口压力和膨胀比的依赖关系。藉助于这个公式，对整个这些工作状态感兴趣的范围，能够计算出比能量消耗、比吸气容积和分离喷嘴的比缝长。按照工业规模的喷嘴分离工厂的工艺和经济方面对这些具体的量进行了分析，并确定了一个成本因子，以比较这个系统的成本同一个具有给定工作条件的喷嘴分离的参考系统的成本。这些成本分析的结果（它是在最佳化过程中不断地完成的）在研究喷嘴分离系统最佳工作状态的进一步的实验中被用来提出条件。

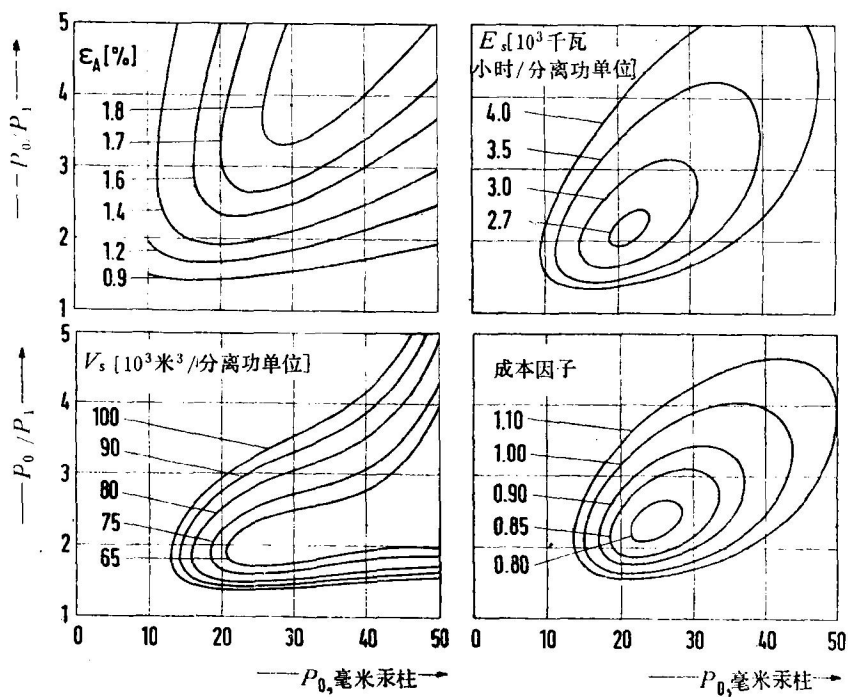


图6 进口压力 P_0 和膨胀比 P_0/P_1 对分离效应 e_A 、理想的比压缩功 E_s 、比吸气容积 V_s 和成本因子的影响。 e_A 、 E_s 、 V_s 和成本因子等是按照在研究一般分离喷嘴系统的最佳化中所确定的

不可避免的是研究最佳化需要不断地修改工作状态。但是有关过程工艺的改进工作必须在固定的工作条件下实现。所以在逐步的过程中确定了最佳化，并且把 1973 年对一般的分离喷嘴所达到的最佳工作状态作为进一步改进工艺的基础。图 6 是 1973 年得到的结果。因此，当前关于工艺过程的改进工作（将在下一个报告中讨论）是基于一种理想的比压缩功为 2700 千瓦小时/分离功单位和比功率消耗为 4000 千瓦小时/分离功单位的对应的分离喷嘴和工厂。由于分离喷嘴的相对低的投资和维护费用，在这些条件下，已可预期其分离功成本可与气体扩散法的相比拟。

当前的发展方面

在一般的分离喷嘴第一个最佳化实现之后，试验设备就用来研究其它有希望类型的分离喷嘴系统。为了介绍这个发展工作的概念，下面将叙述关于对向喷射的喷嘴分离系统的研究工作。

在一般的分离喷嘴系统里流线的弯曲是由气体喷流在固定的曲壁上偏转产生的，而在靠近壁的流动区域有陡峭的速度梯度存在。这就导致比较高的磨擦损耗并对分离有决定作用的离心力有着不利的影响。借助于几股气体喷流的相互偏转既可以产生弯曲曲线而同时又可以避免陡峭的速度梯度^[10, 11]。基于这种概念的喷嘴分离系统示于图 7。在这种情况下，流场中由两股对向的气体喷流所产生的流线的曲度被用于同位素分离。

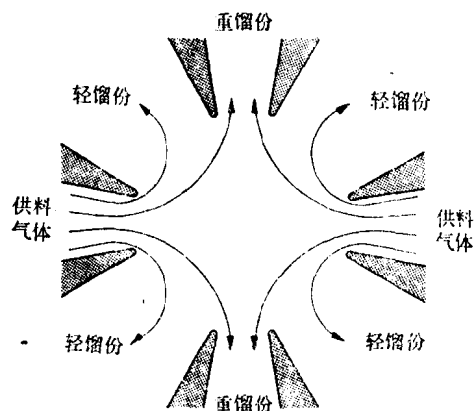


图 7 对向喷射的分离喷嘴系统的示意图

图 8 表示的是用自由分子探测器在这种系统中完成的流量测量的结果，工作气体是 He 和 SF_6 的混合物。图中指示的是对混合物的重成分在流场中局部流动的方向。从这些测量的结果明显地看出，流线达到很大的偏转角并获得均匀的弯曲度。

关于这种系统的分离实验，已经用 H_2/UF_6 和纯 UF_6 分别作过^[12]。图 9 表示的是一般的分离喷嘴和对向喷嘴之间的分离特性的比较，工作气体都是 H_2/UF_6 的混合物。它清楚地表明，在低膨胀比的区域用对向喷嘴系统达到的同位素分离的基本效应比用喷流在曲壁偏转的要高。这可以解释为，在低流速区即低膨胀比区域分离效应明显地随着流速的加大而增加。相应地对向喷嘴系统的磨擦损耗较小，因而得到较高的分离效应。但是，在更高的膨胀比下，没有达到一般喷嘴系统的有利分离性能，这是由于在对向系统里流场随着膨胀比的增加而发生了明显的变化，其结果导致了除其它效应外在分流片的前面流线弯曲度降低。

当用纯 UF_6 作为工作气体时，对向系统在任何情况下都产生比一般的喷嘴更好的结果，能够达到小于 3000 千瓦小时/分离功单位的理想的比压缩功。但是在这种情况下比吸气容积和比缝长都显著地增加了，结果是对于这种方法利用纯 UF_6 在经济上是不利的。

两种系统在经济上的比较可以看出，在目前的发展阶段用固定偏转壁的分离元件比对向

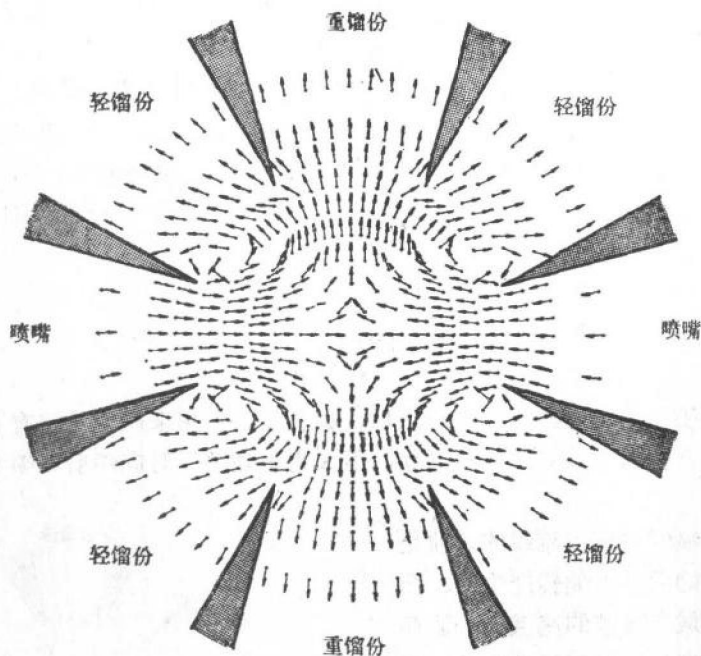


图8 用自由分子探测器的办法测得的在对向喷射流场中重组分 SF_6 的局部流动方向 (He/SF_6 混合气体—4 摩%的 SF_6 , 进口压力 $P_0 = 0.4$ 毫米汞柱, 轻馏份的膨胀比 $P_0/P_1 = 2$, 重馏份的膨胀比 $P_0/P_1 = 1.4$)

分离喷嘴更好些。但是, 由于对两种系统最佳化的研究远远没有完成, 可以预期, 对对向系统和对一般的分离喷嘴系统在分离性能上都会有重要的改进, 对经济问题作全面的比较在目前是不可能的。

必须扼要地指出, 对向喷射偏转的概念, 对于更好地使用由辅助气体引起的同位素分离的中间增长可能是特别有意义的。理论上证明, 利用在喷嘴入口处 UF_6 在轻的辅助气体里的非均匀分布可以改善这种效应。实际上, 当把具有不同比例含量的 UF_6 (如在分离喷嘴级联中所形成的那样) 供入分离喷嘴单元时, 这样的分布是能够达到的。但是, 理论和实验的研究表明, 最佳运行压力在此情况下降低了。相应地, 流动的雷诺数下降了, 而磨擦损失将更强地影响流速。为了利用非均匀的 UF_6 的初始分布来提高分离效应, 对向喷射偏转的概念比一般的分离喷嘴更有希望, 因为用这种概念能够降低磨擦损失。

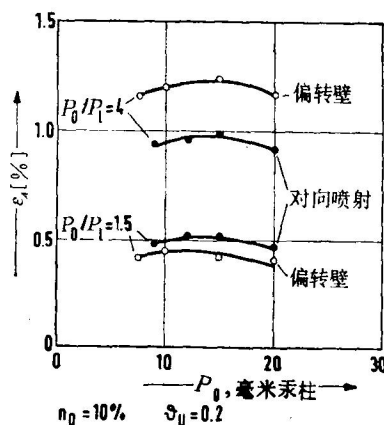


图9 关于对向喷射系统和一般分离喷嘴系统在不同的膨胀比 P_0/P_1 下, 进口压力 P_0 对分离效应的影响 (H_2/UF_6 混合气体—10 摩%的 UF_6 , UF_6 分流比 $\theta = 1/5$)

结 论

在目前的发展情况下,一般分离喷嘴系统和对向喷射系统一样都可以认为在经济方面作进一步的改善是有希望的。因此关于两种系统的系统研究工作将来会继续下去。除此以外,在发展更复杂的分离喷嘴系统的概念,以进一步发挥分离喷嘴法的潜力。但是就目前来说,这个工作只是初步的用于加深理解所涉及的现象的目的,而没有完成经济上的评价。尽管如此,到目前为止用这些系统所达到的理想的比压缩功显著地小于 2700 千瓦小时/分离功单位,相应地工厂的比功率消耗将小于 4000 千瓦小时/分离功单位。

从至今所完成的有关喷嘴分离法的物理学方面的研究工作中可以得出结论,喷嘴分离法(它已经可和别的浓缩法相竞争)将来是能够进一步改进的。不管在研究中的各种分离喷嘴系统的特殊的特性如何,可以说,所有这些概念是能够综合到工艺过程的现代发展工作中的。

参 考 文 献

- [1] Becker E.W., BIER K., BIER W., SCHÜTTE R., and SEIDEL D. Separation of the isotopes of Uranium by the separation nozzle process. *Angewandte Chemie, international edition in English*, 1967, 6, 507—518.
- [2] BECKER E.W., BIER W., EHRFELD W., EISEBEISS G., FREY G., GEPPERT H., HAPPE P., HEESCHEN G., LÜCKE R., PLESCH D., SCHUBERT K., SCHÜTTE R., SEIDEL D., SIEBER U., VÖLCKER H., and WEIS F. The separation nozzle process for enrichment of Uranium 235. 4th United Nation International Conference on the peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1971. A/Conf.49/p. paper 383.
- [3] BECKER E.W., BIER W., EHRFELD W., SCHUBERT K., SCHÜTTE R., and SEIDEL D. Present state and development potential of separation nozzle process. KFK 2067, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, 1974.
- [4] BECKER E.W., BIER W., FRITZ W., HAPPE P., PLESCH D., SCHUBERT K., SCHÜTTE R., and SEIDEL D. Current status of separation nozzle technology. International Conference on Uranium Isotope Separation, London, 1975.
- [5] GEPPERT H., SCHUHMAN P., SIEBER U., STERMANN H.P., VÖLCKER H., and WEINHOLD G. The industrial implementation of the separation nozzle process. International Conference on Uranium Isotope Separation, London 1975.
- [6] BLEY P., DÜRR R., EHRFELD W., and EISENBEISS G. Die physikalischen Grundlagen der Uran-235-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren III. Die Mechanismen der Entropieerzeugung in der Trenndüsenströmung. *Zeitschrift für Naturforschung*, 1973, 28a, 1273—1280.
- [7] BIER K., BRANDTSTÄDTER H., EHRFELD U., and EHRFELD W. Untersuchung des Strömungsverlaufs von He/Ar- und He/SF-Gemischen in der Trenndüse mit molekular angeströmten Drucksonden. KFK 1440, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, 1971.
- [8] BECKER E.W., BIER W., EHRFELD W., and EISENBEISS G. Die physikalischen Grundlagen der Uran-235-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren. I. Die Wirkung des leichten Zusatzgases. *Zeitschrift für Naturforschung*, 1971, 26a, 1377—1384.
- [9] BLEY P., EHRFELD W., JÄGER F.M., and KNAPP U. Entwicklung und Erprobung einer Versuchsanlage für die Optimierung von Trenndüsen-Systemen zur Anreicherung von Uran-235. KFK 2092, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, 1975.
- [10] BECKER E.W. Verfahren zum Trennen von gasförmigen Stoffen, insbesondere Isotopen. German patent 1 096 875, July, 1961.

[李儒顺 译]

分离喷嘴技术的现状

贝克尔(E. W. Becker)等

到目前为止,分离喷嘴方法实际应用的最好结果已用 UF_6/H_2 混合物组成的带状气体射流由弯曲壁偏转的分离系统获得。根据这个原理,进一步发展了管状分离单元的不同工业生产的方法。用直径为 50 厘米,长为 2 米的管状分离单元可以得到年分离能力为 50 分离功单位。在过去四年里,工业规模分离喷嘴工厂的主要部件已得到改进和成功地试验。

在卡尔斯鲁厄,用管状分离单元装备的两台原型级,自 1972 年和 1974 年以来一直在顺利地运行。在级联头部, UF_6 再循环能力已用单台外部冷冻样机证实。这些样机的试验为工业规模浓缩工厂的设计和工程提供了必要的知识。用合适的数字计算机模拟,可以以高度的可靠性预测这样的分离喷嘴工厂的运行特性,指出可以预期平稳和内在稳定的级联运行。在这些结果的基础上,开始了一个为每年 2.5—5 兆分离功单位或更大能力的浓缩工厂提供样机的技术规划。

引言

至今为止,分离喷嘴方法实际应用最好的结果是由一个 UF_6/H_2 混合物组成的带状射流沿着弯曲壁偏转的分离系统得到的^[1]。这种分离喷嘴的设计原理(图1),被应用在工作样机上,而且它代表着在分离喷嘴中间工厂上所进行的工程工作的基础。近年来,考虑到工厂设计和部件试验取得的经验,通过对几何参数和工作条件做系统的变更,而使它的性能得到改进。

从 1970 年起,埃森煤炭电力公司参加了这个方法的发展工作,目的是在分离喷嘴工厂中在工艺规模上完成它。在这方面的合作中,已完成了核研究协会和煤炭电力公司之间及本国、外国公司之间的发展协议。这些发展工作为大工厂的建立提供了必要的技术条件,而且也导致对这个方法的经济性的正确估价^[2]。

本文按照技术经验和实验进展,对方法的技术现状给以评论。至于分离喷嘴方法的长期发展潜力,超出今天现有技术范围的进一步发展设想的途径,将在另外的报告中描述^[3]。

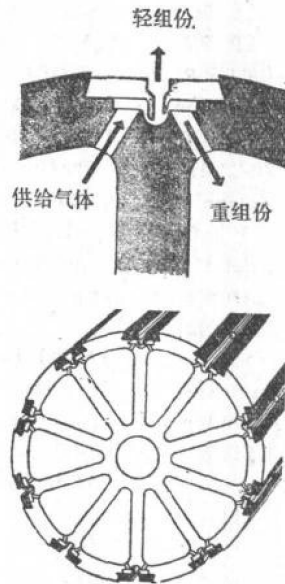


图1 狭缝型分离喷嘴和带有十个狭缝型分离单元管的剖面

分离喷嘴的生产

因为分离单元的最佳工作压力与喷嘴的特征尺寸成反比, 而高的工作压力在经济上是有利的, 因此, 分离单元的特征尺寸要选择得尽可能地小。在工业配合之下, 研究了几种工业生产分离单元的方法, 到目前为止还在经受批生产的检验。

机械制造法

慕尼黑美塞什密特-伯尔科-布洛姆公司(MESSERSCHMITT-BÖLKOW-BLOHM CMBN Munich, 简称 MBB 公司)提出了一种用机械生产管状分离喷嘴单元的方法。到现在为止, 这个生产单位已交付大约 120 个分离单元管

(2 米长), 它的制造原理表示在图 1。装入两台工作原型级中的这些分离单元被置于真实工艺条件下试验, 至今它们工作得很好。这样分离单元管的一段已成功地经受了 30000 小时以上的寿命试验。该试验是在一个特别的试验回路, 在工艺条件下进行的。在这段时间内, 分离效果 ε_A 在测量误差范围内并没有改变(图 2)。

现在的批生产已达到相当低的制造成本, 而且关键性尺寸的公差足够小, 使交付使用的管子的分离效果和关键性尺寸大 15—20 倍的实验室规模的分离单元比较, 达到它的 92—97%。从现在进行的发展工作, 可以期望其性能和成本都将有所改善。

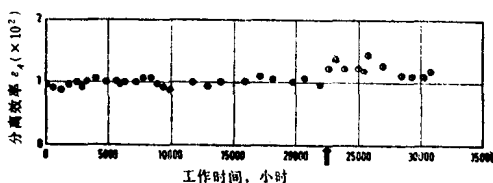


图 2 批生产的分离喷嘴单元寿命试验

图中: ●为 UF_6 /氢混合物;
○为 UF_6 /氢混合物。

光腐蚀法

制造的另外一种方法采用通常应用在超小型电子元件中的光腐蚀技术。图 3a 表示一个金属薄膜的接触印刷板, 在它的上边界腐蚀出了许多分离喷嘴和为气体供料与重组份的气体导管(制造者: 慕尼黑西门子公司)。垛起这样的薄片, 可以得到有很大堆积密度的分离喷嘴系统(图 3b)。如图 3c 所示, 也可以把它们组成分离单元管, 管的一半用作供料管, 另一半被用来输送重组份。轻组份(浓缩的 ^{235}U)逸到管的外面。照此方法, 可以很容易地将这些管装入分离机。



图 3a 用光腐蚀方法实现分离喷嘴结构的金属薄片(放大的)

这个制造方法特别适宜于工业规模生产分离喷嘴的组件, 这些组件比图 1 上部分所示的型式复杂得多, 而且在长期发展过程中, 它仍可能导致工艺过程的进一步改善^[3]。用光腐蚀技术, 外径约 15 厘米, 长 2 米的管子, 在当前发展的阶段可提供约每年 50 分离功单位的分离能力。

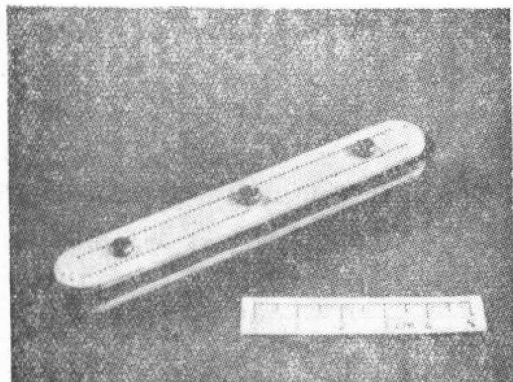


图3b 在覆盖板之间堆集起来的光腐蚀的
分离喷嘴薄片组件

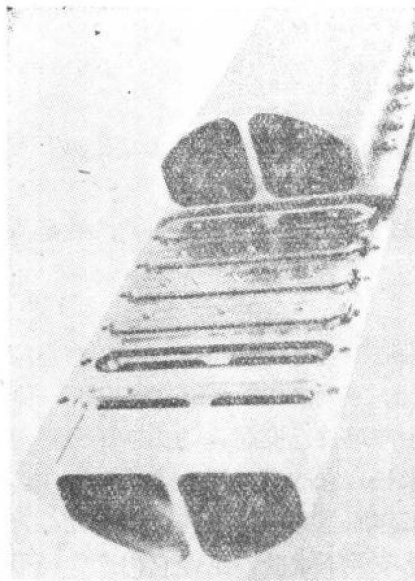


图3c 表明组合过程顺序的管状分离喷嘴系统

工业原型级的运行

在卡尔斯鲁厄建立起来的第一个分离喷嘴原型级的工艺详情早已报道过^[4]。这个级用图1所示型式的分离单元管装配，这些管子是由MBB公司提供的，其长度为2米，直径约为10厘米。图4表示在装入最后一个分离单元时，这个级的分离单元桶。1972年开始的分离试验一直是成功的。这个级的试验，为设计未来的分离喷嘴工厂和确定变化条件下分离级的工作极限，提供了所需要的知识^[5]。

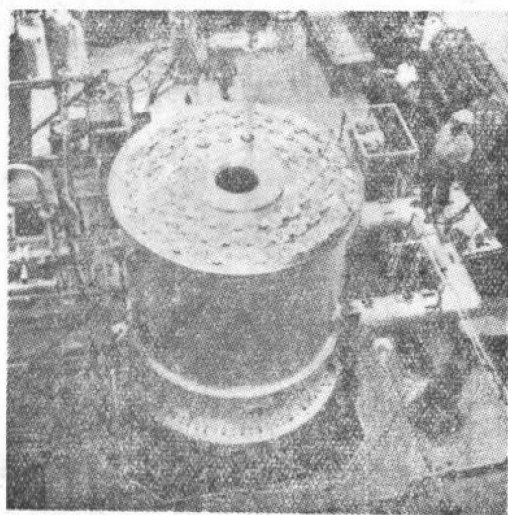


图4 在末一个分离单元管装入时，
大原型级的视图

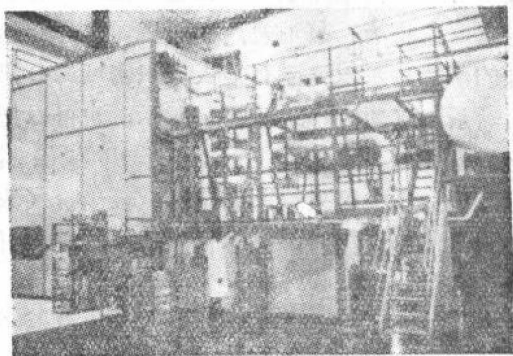


图5 连接到图4样机上的分离
单元试验装置视图

正在使这个级运行, 试验它的一批 80 个分离单元以及试验由现时试生产的单个分离单元管。为了第二个目的, 在这个级上连接了一个分离单元的试验装置 (图 5)。这个装置处置几个试验回路, 用它可以做 2 米长的单个分离单元管的试验, 而又不妨碍这级本身的工作。尽管因为 400 次以上的启动过程引起原型级极度地超载, 但主机部件并未发生损坏。

具有第一个级三分之一生产能力的先进原型级由煤炭电力公司建立。这个级现在也正在卡尔斯鲁厄运行。详细描述由文献[2]给出。

分离喷嘴级联

在目前的发展水平上, 必须将 500 台分离级串联成分离喷嘴级联, 以生产 3% ^{235}U 的浓缩铀并使贫料中的 ^{235}U 的含量约为 0.3% (图 6)。

为了从全部过程的成本的角度来估价分离单元发展的各阶段和相关的或独立的技术方面的改善, 与林德 (LINDE) 公司一起编制了使工厂最佳化的数字计算机程序。用它可以求得工厂布局, 分离喷嘴级联的部件设计和运行条件的最佳化, 从而, 在给定的分离喷嘴、压缩机和其他工厂部件的性能的基础上使浓缩成本最低。

从喷嘴方法现在的成本组成, 工厂最佳化导致仅两种类型级组成工厂结构, 它们的分离能力比约为 1:3, 如在图 6 中, 用级联段宽度所示的。

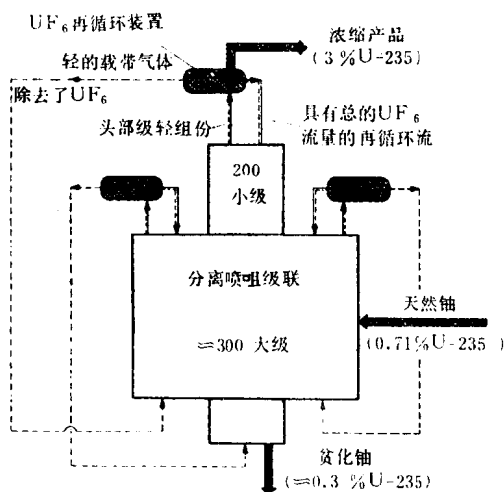


图 6 由两种类型分离级组成的商业分离喷嘴级联和在级联头部有关的 UF_6 再循环装置图解

分离喷嘴级联的运行特性

十级分离喷嘴试验级联 (所谓试验工厂) 的详细实验研究和工艺分离喷嘴级联运行的数字计算机模拟已证明, 在这些工厂中可以保证气体动力工厂特征的固有稳定性, 因此, 在这些工厂中能完成安全而无问题的浓缩工作 [6-8]。

作为局部干扰结果引起典型工厂反应的一个例子, 图 7 给出级联的一段中过渡过程的三维表示图。干扰是由这个段中心级 UF_6 。

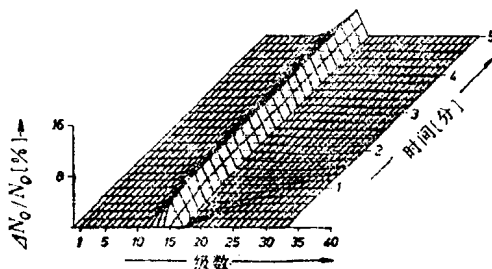


图 7 在分离喷嘴级联中心级, 因 UF_6 分流比减小 5% 产生的 UF_6 浓度过渡过程的三维表示图

分流比突然降低 5% 而引起的。这图表示，相邻级 UF_6 浓度 N_0 。（这儿未表示的级的压力）的固定扰动被限制在 15 级扰动点的最邻近区域。平衡扰动区域充气量改变所产生的浓度过渡过程只向级联头部方向以缓慢的速度传播，因此，对其他级的影响只是很轻微的。扰动影响消失之后，级联不需要再加调整就恢复到它的工作状态。

一个 UF_6 再循环样机装置的运行

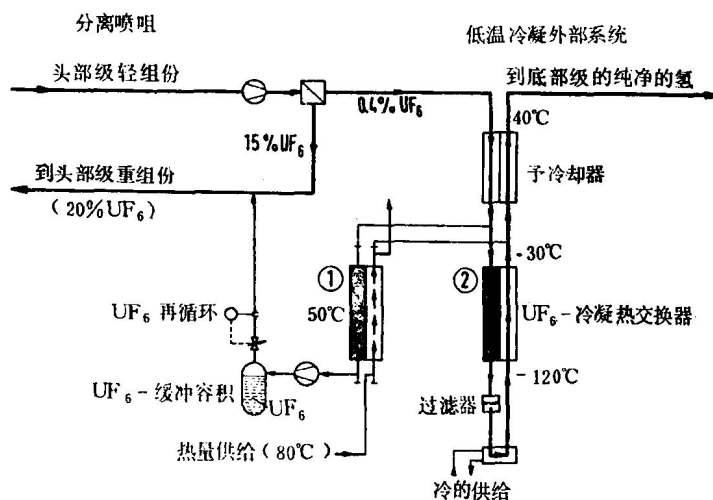


图 8 由一个分离喷嘴，它的后面带有一个低温冷凝热交换器系统，组成的 UF_6 再循环装置的流程图

图中：①——从温暖起来的热交换器进行再循环工作；
②——在冷却的热交换器中进行冷凝工作。

分离喷嘴级联的运行需要使纯粹向上输运的轻的载带气体，从级联段头部到底部进行再循环。为了这个目的，必须把从级联段头部来的相应于轻组份流速的 UF_6 含量高效率地除去，并使含铀量大的部分再循环到级联段头部。

这些过程由图 6 表示的 UF_6 再循环装置完成。这样一个装置的流程（图 8）中有一个特殊喷嘴，它使再循环的流量中的 UF_6 含量减少到很低（所要求的程度），因此限制了系统的 UF_6 储量。在气流中剩余的 UF_6 含量然后被冷凝在以循环方式运转的低温热交换器系统中^[9]。

这样的低温冷凝系统样机已由慕尼黑林德公司建造，而且目前正在核技术方法研究所进行试验。它是由一个联带有冷却系统的单台热交换器系统所组成的。图 9 表示这个样机

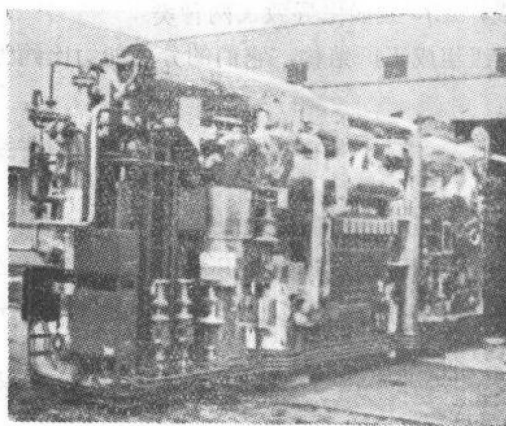


图 9 由慕尼黑林德公司建立的低温冷凝外部样机视图

也包括外围装置的视图。这个装置可以用自己的循环压缩机独立地运行，但是，直接和大的原型级连接也能和这个级一起运行进行试验。在工艺条件下，用氢-UF₆混合物完成的实验证明，在处理过的轻的气体中，可以毫无困难地使得 UF₆含量达到远远低于1ppm的程度^[10]。

未来的技术发展

这里报告的发展工作的结果成功地论证了工艺技术的实质。此外，它们又表明进一步改进的近期潜力。在这些结果的基础之上，由煤炭电力公司^[2]开始一个技术规划。这个规划和核技术方法研究所现在的工作相配合，致力于分离喷嘴过程进一步地工艺实现。在这个规划的范围之内，将提供每年5000—10000分离功单位的分离能力的工作原型级，这样级的规模应能满足每年2.5—5百万分离功单位量级或更大分离能力的工业规模浓缩工厂的需要。

参 考 文 献

- [1] BECKER E.W., BIER K., BIER W., SCHÜTTE R., and SEIDEL D. Separation of the isotopes of uranium by the separation nozzle process. *Angewandte Chemie, International edition*, 6, 507(1967).
- [2] GEPPERT H., SCHUHMANN P., SIEBER U., STERMANN H.P., VÖLCKER H., and WEINHOLD G. The industrial implementation of the Separation Nozzle Process. *International Conference "Uranium Isotope Separation"* London, 1975.
- [3] BECKER E.W., BERKHAHN W., BLEY P., EHRFELD U., EHRFELD W., and KNAPP U. Physics and Development Potential of the Separation Nozzle Process. *International Conference "Uranium Isotope Separation"* London, 1975.
- [4] BECKER E. W., BIER W., EHRFELD W., EISENBEISS G., FREY G., GEPPERT H., HAPPE P., HEESCHEN G., LÜCKE R., PLESCH D., SCHUBERT K., SCHÜTTE R., SEIDEL D., SIEBER U., VÖLCKER H., and WEIS F. *Internat. konferenz der U. N. Über die friedliche Nutzung der Atomenergie; A/Conf. 49/p383* (Genf 1971).
- [5] SEIDEL D. and SIEBER U. Die Betriebsgrenzen einer technischen Trenndüsenstufe zur Anreicherung Von Uran 235; KFK 1801, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe (1973).
- [6] SCHÜTTE R., SETDEL D., FRITZ W., PLESCH D., LINDER G., and FRITSCH H. J. Experimentelle und theoretische Untersuchungen des stationären Betriebsverhaltens Von Trenndüsenkaskadeu für die U-235-Anreicherung; *Chemie-Ing. Technik* 44, 1099(1972).
- [7] FRITZ W., HOCH P., LINDER G., SCHÄFER R., and SCHÜTTE R. Experimentelle Untersuchung und Digitalrechner-Simulation des instationären Betriebsverhaltens Von Trenndüseu-Kaskaden für die 235-U-Anreicherung. *Chemie-Ing. Technik* 45, 590(1973).
- [8] SCHÜTTE R. Das gasdynamische Betriebsverhalten und die Kriterien der inhärenten Stabilität Von Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung. KFK 1986, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe(1974).
- [9] FRITSCH H. J. and SCHÜTTE R. Trennung Von UF₆ und Zusatzgas bei Tranndüsenanlagen mit einer Kombination Von Vorabscheidungs-Trenndüse und Tieftemperatur-Feinabscheidung. KFK 1437, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe (1971).
- [10] SCHMID J. and SCHÜTTE R. Experimentelle Untersuchungen der Tieftemperaturabscheidung Von UF₆ aus Gemischen mit Inertgasen. (to be published).

[淑琴 译]