

CNIC-01561
SINRE-0095

溶胶分散及核燃料微球尺寸控制技术综述
**AN OVERVIEW ON TECHNIQUES OF SOL
DISPERSION AND THE SIZE CONTROL OF
NUCLEAR FUEL MICROSPHERES**
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01561
SINRE-0095

溶胶分散及核燃料微球尺寸控制技术综述

王录全 曹新生 应诗浩
(中国核动力研究设计院, 成都, 610041)

摘 要

介绍了国内外不同溶胶-凝胶工艺中采用的溶胶分散过程控制方法及其对改善陶瓷核燃料微球尺寸分布, 从而提高其尺寸合格率的影响。对各种控制方法的优劣及结果进行了对比, 认为带振动的双流喷嘴是控制溶胶分散过程的有效方法。着重讨论了带振动的单流喷嘴控制溶胶分散过程以改善小颗粒核燃料微球尺寸分布的可行性。

**An Overview on Techniques of Sol Dispersion and the Size
Control of Nuclear Fuel Microspheres**
(In Chinese)

WANG Luquan CAO Xinsheng YING Shihao
(Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

The sol dispersion process controlling methods used in different Sol-Gel technologies natively and abroad as well as the effects of these methods to the size distribution advancement so as to enhance the size qualification rate have been stated. The advantages and disadvantages as well as the final results of different controlling methods have been compared. The method of two-fluid nozzle with vibration is considered as an effective method for the controlling of sol dispersion process. The feasibility of using single-fluid nozzle with vibration to control sol dispersion process so as to improve the size distribution of fine nuclear fuel microspheres has been discussed.

引言

采用溶胶-凝胶工艺制备陶瓷核燃料微球时，溶胶液滴的大小及均匀性决定了最终陶瓷核燃料微球的大小及均匀性。由于自然分散形成的溶胶液滴的尺寸呈较宽的正态分布，导致制得的 UO_2 微球的尺寸呈较宽的正态分布，而用于弥散燃料的核燃料微球的尺寸范围窄，这就使得核燃料微球的尺寸合格率低。解决这个问题的办法是对溶胶分散过程进行控制，使溶胶液滴的尺寸分布范围变窄，并使其平均直径落在规定的范围内，从而提高核燃料微球的尺寸合格率，降低生产成本。

国外在这方面的研究工作始于 20 世纪六七十年代，对用于高温气冷堆的 UO_2 微球的尺寸控制研究得比较深入，已应用于生产。国内的研究工作起步较晚，只有清华大学核能所及中国核动力研究设计院对此进行了研究。文献调研表明，由于这些研究工作采用的工艺不同，各自的侧重点也不完全相同，因而通用性较差。对直径大于 $200\ \mu\text{m}$ 的核燃料微球的尺寸控制，已经取得了理想的结果，微球的尺寸合格率已经达到 90% 以上，但对小颗粒核燃料微球的尺寸控制则比较困难，结果比大尺寸的差得多，更无详细的资料报道。我们以前也开展过研究，但迄今为止还没有理想的试验结果，对溶胶分散过程的研究还有待深入和改善。下面对这些研究工作及结果作一简要综述。

1 研究历史背景回顾

迄今为止，在不同的时间及地区人们对溶胶-凝胶工艺中的溶胶分散过程进行过研究。这些研究工作按所采用的工艺可分为内胶凝工艺、外胶凝工艺及其它胶凝工艺；按控制溶胶分散过程的方法可分为双流喷嘴、单流喷嘴振动分散以及双流喷嘴振动分散三种方法；按振动的施加方式可分为振动喷嘴及静止喷嘴两种方法；按喷嘴布置的方向可分为垂直、水平及与水平成某一角度等。

1.1 国外研究概况

对溶胶分散过程的研究及控制始于 1970 年。在意大利的 SNAM 流程上，G. Brambilla 等人首先采用双流喷嘴控制溶胶分散过程，改善溶胶液滴的尺寸分布，并控制其大小。其试验装置及实验结果如图 1 示。该法采用凝胶支撑沉淀法（属于外胶凝工艺），以氨水作胶凝介质，空气作为双流喷嘴中的驱动流，得出了一个初步的结论，即随空气流量的增大，溶胶液滴的尺寸变小^[1]。

1972 年，美国的 P. A. Hass 采用双流喷嘴的方法控制分散过程，其双流喷嘴的结构如图 2 示。2-乙基己醇既作驱动流，又作胶凝介质。对 $2.6\ \text{mol/L ThO}_2$ 溶胶得到脉动破碎方程：

$$d=0.6D/(q/Q)^{1/2} \quad (1)$$

式中： d 为煅烧 ThO_2 球的直径； D 为喷嘴内径（2-乙基己醇流道）； q 为 2-乙基己醇流量； Q 为溶液流量。从这个方程可知， d 与溶胶毛细管径无关。采用该法可改善液滴的均匀性，当形成的溶胶液滴的直径约为毛细管径的一倍时，液滴的均匀性最好，此时

溶胶喷射流离开毛细管端时不被加速 (或减速), 喷射流达到稳定分散状态, 而喷射流最稳定的分散正是所希望的。当溶胶流量为 13 ml/min 时, 直径在 350~420 μm 范围内的微球占 90%, 如果对双流喷嘴施加一个与平均成滴频率相同的振动频率, 烧结微球的均匀性还可进一步改善^[2]。

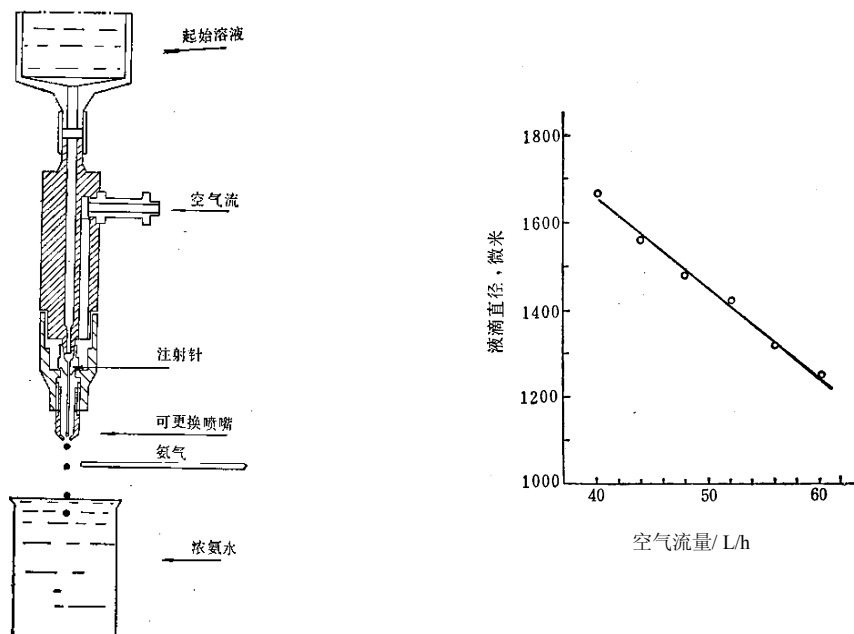


图1 意大利控制溶胶分散过程的实验装置及结果

1974 年, 在许多工艺流程上都对溶胶分散过程进行了研究并采取了相应的控制措施, 如西德的 H. Huschka 等人在 NUKEM 流程上采用振动双流喷嘴 (即振动通过双流喷嘴传递给溶胶喷射流) 控制溶胶分散过程, 使直径在 450~630 μm 范围内的微球所占的比例达到约 95%~98% (质量分数), 在以内胶凝工艺为基础的 KFA—H 流程中, 采用同样的方法, 使直径在 177~250 μm 范围内的微球所占的比例达到约 90%^[3,4] (质量分数)。

同年, 在美国的 ORNL 流程上, R. G. Wymer 等人采用带振动的双流喷嘴 (即振动由活塞杆通过液体传递给溶胶喷射流) 控制溶胶分散过程, 改善微球的尺寸分布, 其双流喷嘴及其与振动装置的连接结构如图 3。为了扩大生产能力, 还采用了带振动的多孔双流喷嘴及带振动的

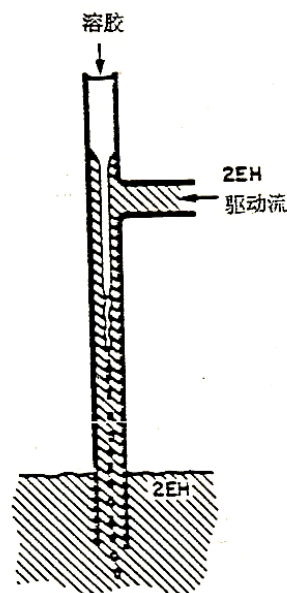


图2 美国 ORNL 所用双流喷嘴示意图

多孔剪切喷嘴，其结构如图 4。该法采用脱水胶凝的方法，以 2-乙基己醇作为驱动流及胶凝介质，振动通过活塞杆对夹套内的液体施加压缩和舒张的作用，从而对溶胶喷射流施加振动作用，分散形成的溶胶液滴在驱动流的保护和隔离下，彼此分离地进入胶凝介质。所得的结果为：制大球时，当溶胶流量为 12~16 ml/min，振动频率为 430~600 Hz 时，平均直径为 300~500 μm 的微球的产率大于 95%（质量分数）；制小球时，当溶胶流量为 6 ml/min，振动频率为 1400 Hz 时，直径在 125~210 μm 范围内的微球的产率大于 90%（质量分数）。如果直径在 $(1 \pm x) d_p$ (x 为某一百分数， d_p 为微球直径) 范围内的微球所占的百分数为 y ，则 d_p 越小， y 越小，即颗粒直径的均匀度是颗粒直径的函数，直径越小，均匀度越差^[3, 5]。

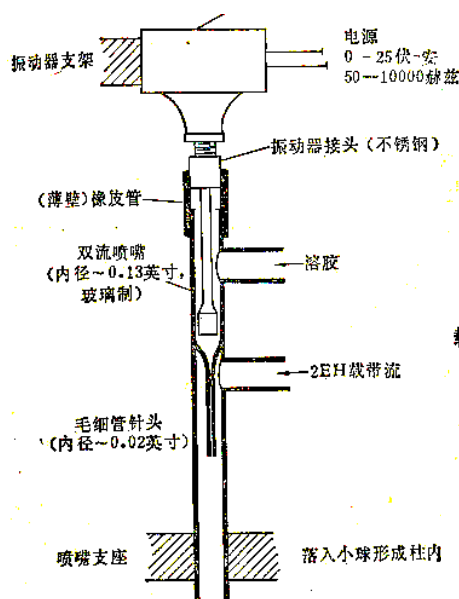


图 3 带振动的双流喷嘴

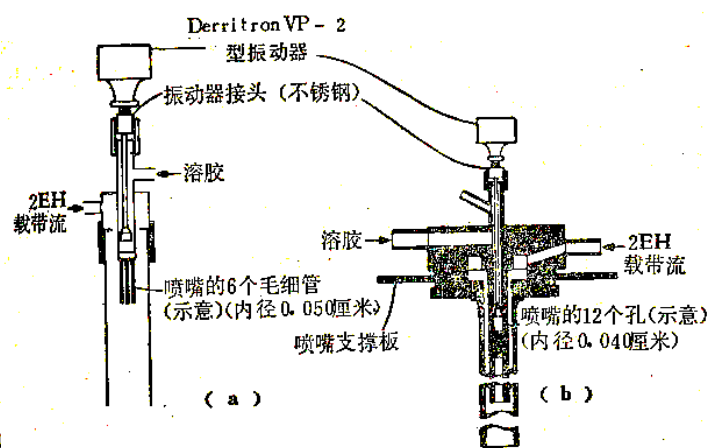


图 4 (a) 带振动的有六个毛细管的双流喷嘴
(b) 带振动的十二孔剪切喷嘴

1975 年，在以外胶凝为基础的 KFA 流程上，德国的 H. Ringel 采用振动双流喷嘴的方法对溶胶分散过程进行了较详细的研究，其双流喷嘴的结构及实验装置如图 5。在振动的施加方法上，该法与美国 ORNL 所用的方法不同。ORNL 采用静止喷嘴，振动由活塞杆通过液体传递给溶胶喷射流，而该法采用振动喷嘴，振动通过喷嘴传递给溶胶喷射流。以含氮的甲基已丁基酮作为胶凝介质，以不含氮的甲基已丁基酮作为驱动流，在振动频率为 300~900 Hz 的范围内用照相的方法检测了溶胶分散成滴过程的变化情况，获得了直径为 300~500 μm 的 UO_2 微球。对于特定喷嘴，用不同的准数群作出了均匀分散成滴的操作区域图，并在中间工厂上得到了验证^[3, 6]。

1979 年，在美国的 ORNL-CUSP 流程上，P. A. Hass 等人对溶胶分散过程进行了更深入的研究。他提出：中粗颗粒（直径大于 300 μm ）核燃料微球宜用三氯乙烯作为胶凝介质，以内胶凝法制备，控制溶胶分散过程的方法是采用双流喷嘴并施加振动，即采用静止喷嘴，振动由活塞杆通过液体传递给溶胶喷射流；精细颗粒（直径约几十微米）核燃

料微球宜以 2-乙基己醇作为胶凝介质，采用脱水胶凝法制备，此时施加振动不能满足要求，需依靠双流喷嘴中驱动流的湍动使溶胶喷射流破碎成滴。制备精细颗粒的结果为，直径在 $0.7d_{50} \sim 1.4d_{50}$ 范围内的微球所占的比例约 60%^[7]（质量分数）。

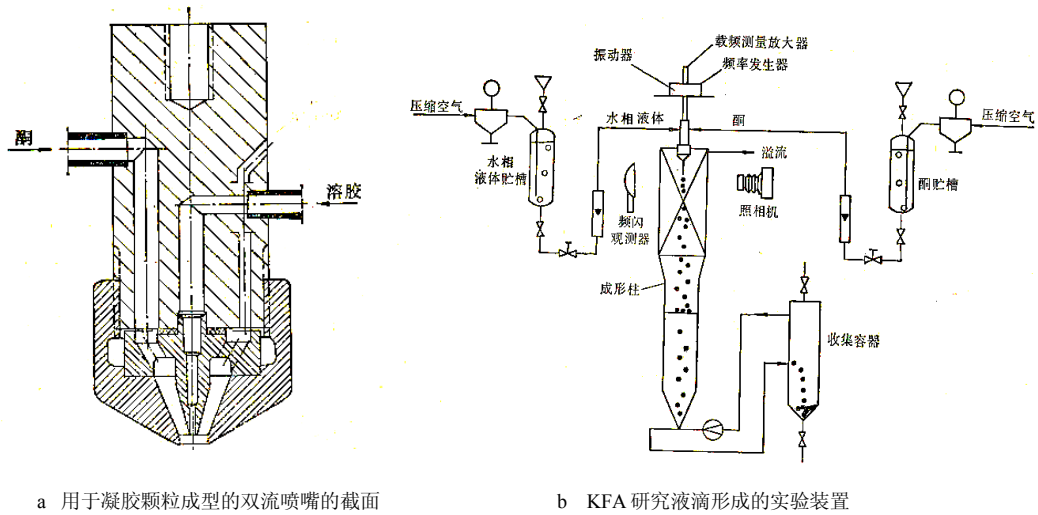


图 5 西德 KFA 的双流喷嘴结构及实验装置

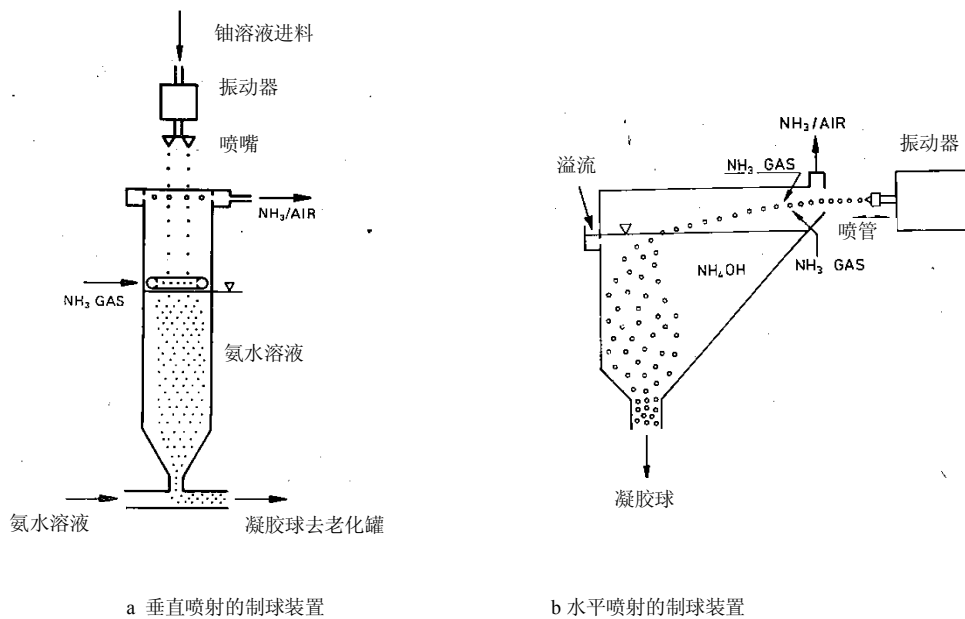


图 6 西德 KFA-EGU 的实验装置

同年，于里希核能研究中心的 Paul Nafe 等人在基于外胶凝工艺的 KFA-EGU 流程上采用单流喷嘴振动分散的方法对溶胶喷射流在空气或氨气中的分散过程进行了控制研究，其实验装置如图 6。他们采用振动喷嘴的方法对溶胶喷射流施加振动，溶胶喷射流在

垂直或水平的方向上被分散，采用的振动频率为 1500 Hz，据称获得了均匀分散。他们认为，当喷射流在水平方向上被分散时，效果更好，因为水平方向上的分散可避免分散形成的液滴在进入胶凝介质时重新结合，从而改善其均匀性，但无具体实验结果；相对于在液体中分散，在空气中分散能获得更高的分散频率^[8]。同样，该研究中心的 H. D. Ringel 等人在 KFA-EGT 流程上使溶胶喷射流在水平方向上被分散，也获得了较好的结果，没有过筛时，直径为 400 μm 的烧结芯核的标准偏差约为 3 μm ^[9]。

1982 年，美国 ORNL 的 Chihang, R. Chu 等人利用似水液体对喷射流的振动分散过程进行了较详细的研究，其实验装置如图 7 示。采用单流喷嘴，喷嘴的方向与水平方向成 45 度角以减少液滴重新结合的机会。利用频闪灯观测液体喷射流分散过程，边观测边调整参数，使喷射流在振动的作用下达到均匀分散，从而检测某些参数恒定时，实现振动均匀分散时另一参数的可变范围。再利用照相的方法分析液滴之间的距离及液滴的大小。其结果表明，喷射流均匀分散时，液滴与喷嘴的直径比在 1.56~2.62 的范围内，与文献值相符。对不同的流体及不同大小的喷嘴，用喷射流速度对振动频率作出了振动均匀分散时的操作区域图。

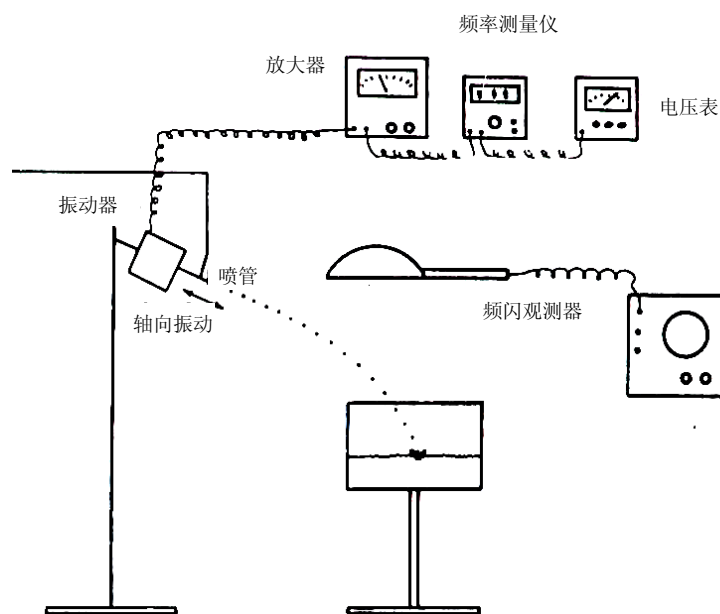


图 7 液滴成型研究的实验装置

值得一提的是，他们设计了一种独特的液体俘获帘，如图 8 示，依靠液体帘的流动使进入液体帘的液滴迅速离开原位，对避免分散形成的液滴的重新结合大有好处^[10]。

1987 年，印度的 V. N. Vaidya 等人在内胶凝工艺的基础上，采用单流喷嘴振动分散的方法控制溶胶分散过程，喷嘴置于垂直方向上，但无具体的分散实验结果^[11]。1991 年，印度的 N. Kumar 等人又在内胶凝工艺的基础上，采用单流喷嘴振动分散的方法控制溶胶分散过程，喷嘴置于水平方向上，但同样没有具体的分散实验结果^[12]。

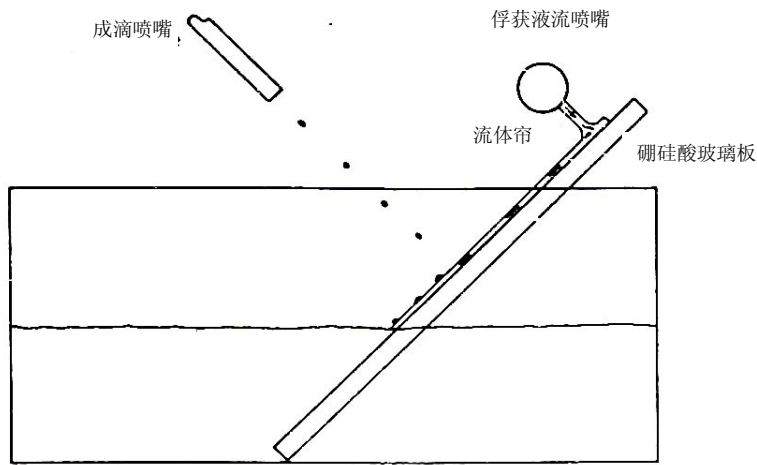


图 8 液体俘获帘装置

1.2 国内研究概况

1990 年，清华核能所的徐志昌等人在外胶凝工艺基础上采用单流喷嘴振动分散的方法对溶胶分散过程进行了控制，采用振动喷嘴的方法，使溶胶喷射流在垂直方向上被振动分散，其实验装置如图 9，分散形成的溶胶液滴首先进入氨气，经初步胶凝定型后再进入胶凝介质氨水中。

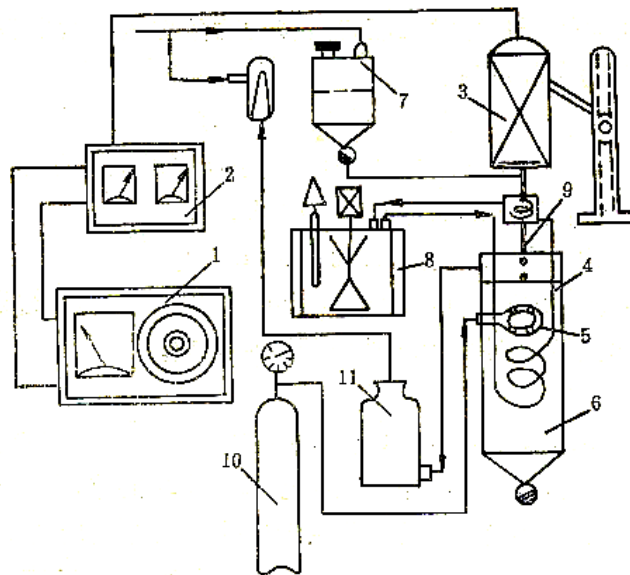


图 9 制造 $UO_2 \cdot nH_2O$ 凝胶微球的设备、

- 1——信号发生器； 2——功率放大器； 3——激振器； 4——热交换系统； 5——氨气分布环；
- 6——胶凝柱； 7——溶胶缸； 8——恒温水浴； 9——喷嘴； 10——氨气瓶； 11——氨气吸收瓶。

提出了几何因子及物理因子两个准数群，并由此组合出一个相应于某一特定喷嘴及温度的极限流量，再根据所需产品的直径大小，由下式即可求出相应的振动频率：

$$f=Q/V=Q/(1/6\pi d_s^3)=Q/(1/6\pi k d_p^3) \quad (2)$$

式中： f 为振动频率； Q 为溶胶极限流量； V 为每一溶胶滴体积； d_s 为溶胶滴直径； d_p 为产品 UO_2 微球直径； k 为从溶胶滴到产品微球的直径收缩率。在该频率附近微调振动频率即可获得所需的溶胶液滴。为了获得均一的胶滴，应当严格设计并控制几何因子、物理因子、极限流量和振动频率这四项参数，参数间的相互关系如图 10 示。结果表明，在 26 °C 时获得均匀分散的溶胶流量为 0.0826 cm³/s，胶滴尺寸为 0.64 mm，控制分散的频率为 600±20 Hz，与计算值符合甚好，粒度范围为 200±20 μm 的致密 UO_2 芯核的合格率大于 95%^[13]。

1993 年，该所又将同样的溶胶分散过程控制方法用于全胶凝工艺中的溶胶分散过程，结果表明，直径约 500 μm 的烧结芯核的尺寸合格率大于 85%，但无具体的尺寸分布数据^[14]。

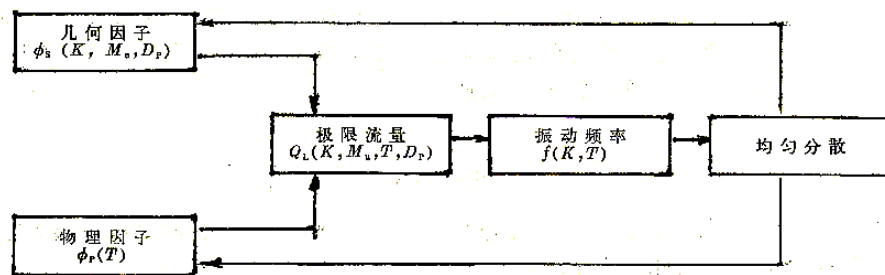


图 10 均匀分散与四项参数间的关系

1997 年，该所在全胶凝工艺的基础上，对溶胶分散过程作了进一步研究和控制，采用的控制方法与以前基本相同。他们提出，要实现均匀分散，必须满足均匀分散流量方程和振动频率方程，均匀分散流量方程即极限流量方程，它由几何因子和物理因子构成，而振动频率方程又由极限流量和溶胶密度构成。在此基础上进行了五批次实验，结果较好。对分散高度对球度 (d_{max}/d_{min}) 的影响进行了探讨，得到一合理值。着重讨论了振动加速度对球度的影响，认为当振动加速度等于重力加速度时，所得微球的球度最好。直到现在为止，清华核能所从事的研究工作都是为制备高温气冷堆大颗粒 UO_2 微球而作，在全胶凝工艺上，用单流喷嘴振动分散的方法制备直径为 500 μm 的 UO_2 微球已取得了满意的结果^[15]。

中国核动力院顾树川等人在 1980 年以前就开展了对溶胶分散过程的研究工作，对溶胶中的铀含量、分散压力、喷嘴孔直径等参数对分散过程及微球直径的影响进行了研究，得出了一些初步结论，如分散压力越小、喷嘴孔直径越大、铀浓度越高，所得微球的直径越大。这些研究工作都是在喷射流自然分散的条件下所作的，未对溶胶分散过程施加任何控制手段^[16]。

1989年，中国核动力院曹新生等人对溶胶分散过程施加了控制手段并进行了研究，但由于当时的条件及研究方向所限，在内胶凝工艺的基础上，对大颗粒 UO_2 微球的尺寸控制只作了一些探索性的实验，控制溶胶分散过程的方法是单流喷嘴振动分散，利用振动喷嘴使溶胶喷射流在垂直的方向上被振动分散，结论是肯定的^[17]。主要工作是研制小颗粒核燃料微球，将分散器由原先的针头改为自制孔板分散器，在自由分散的条件下，使最终小颗粒 UO_2 微球的尺寸合格率达到约 40% (质量分数)，比采用针头时大大提高^[18]。

从 1992 年到 1994 年，王录全等人对溶胶分散过程进行了更详细、深入的控制研究，其振动分散装置如图 11。

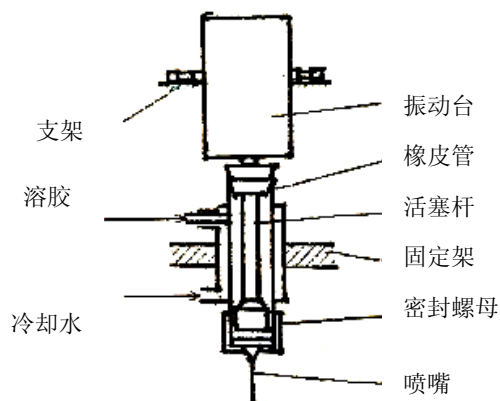


图 11 振动分散装置示意图

以内胶凝工艺为基础，控制溶胶分散过程的方法是单流喷嘴振动分散，喷嘴置于垂直方向上，振动由活塞杆通过对液体的压缩和舒张作用而传递给溶胶喷射流，使溶胶喷射流在垂直方向上被振动分散。探讨了溶胶喷射流的流速、活塞杆的振动频率、振幅及分散距离对分散过程的影响，为了实现均匀分散，分散相的高度（分散距离）和振幅应该保持一较佳值，当溶胶流量、振幅及分散距离都比较合适且保持不变时，所得干燥凝胶微球的直径随振动频率的增加而减小。对大颗粒微球的尺寸控制已取得了较好的结果，但对小颗粒微球的尺寸控制只作了一些探索性的试验研究。

从 1997 年到 1998 年末，为了进一步提高小颗粒 UO_2 微球的尺寸合格率，对溶胶分散过程进行了进一步的控制研究。由曹新生等人在内胶凝工艺的基础上建立了一套控制分散过程的实验装置。采用双流喷嘴、振动分散的方法控制溶胶分散过程，喷嘴静止不动，振动由活塞杆通过液体传递给溶胶喷射流，分散形成的溶胶液滴在驱动流的隔离和保护下，彼此分离地进入胶凝介质。振动的施加方法与王录全等人采用的方法基本相同，但增加了一个对溶胶液滴起分散和保护作用的驱动流。初步实验了各种参数对分散过程的影响，得到了一些较好的实验结果。

1999 年初开始，王录全等人继续进行这一研究工作。所采用的实验装置与曹新生等人所用的基本相同。改进了双流喷嘴的结构，提高了双流喷嘴内外套管的对中性，使双流喷嘴中驱动流的作用更加有效。进一步实验了各参数如驱动流流量、振动频率及振幅

对分散的影响，找出了较佳的实验参数。但由于对分散过程不能直接观察，难于弄清实验结果重复性差的原因。

除了以上这些控制溶胶分散过程的方法外，还有一些控制溶胶分散过程的其它方法，这些方法可按施加振动与否来分类。在非振动类中，可以采用底部开有多孔的桶，溶胶注入桶内，在重力的作用下，溶胶从孔中流出，依靠界面张力的作用自然分散成滴。在振动类中，有以下一些方法：（1）在喷嘴附近的料管上增设一个弹性模片，对该模片施加振动，依靠弹性模片的变形对溶胶喷射流施加振动；（2）把橡胶料管夹在一固定板和振动器之间，通过振动对料管的挤压而对溶胶喷射流施加振动；（3）振动毛细管使流经毛细管的喷射流在垂直于轴的方向分散；（4）给喷嘴施加一个起振动作用电位等等。在这些振动分散的方法中当振动频率接近自然分散的频率时，都能得到均匀分散，当振动频率与自然分散频率的差值增大时，振动对分散的影响逐渐减弱，液滴均匀性逐渐变坏。

2 讨论

通过以上研究历史背景的回顾，可以看出：溶胶-凝胶工艺制备陶瓷核燃料微球时，控制溶胶分散过程的方法有三种，一种是采用单流喷嘴振动分散的方法，使溶胶喷射流在振动的作用下均匀分散成滴，从而改善溶胶液滴的均匀性，通过控制溶胶流量及振动频率的大小可控制溶胶液滴的大小，如德国的 H. D. Ringel, Paul Naefe, 中国核动力院的曹新生及清华核能所的徐志昌等人就采用这种方法控制溶胶分散过程，取得了较好的结果。

另一种方法是采用双流喷嘴，使溶胶喷射流在驱动流的保护下分散成滴，驱动流使分散形成的溶胶液滴彼此分离，避免其重新结合或再次分散，因而可改善形成的溶胶液滴的均匀性。驱动流的速度如果比溶胶喷射流的速度大，驱动流对溶胶喷射流起加速的作用，因而可加快溶胶喷射流成滴的速度，使溶胶液滴的直径减小，因此在相同的溶胶喷射流速度下，通过调节驱动流的速度可控制溶胶液滴的大小，意大利的 Brambilla G., 美国的 W. D. Bond, P. A. Hass 及德国的 R. Foethmann 等人就是采用这种方法控制溶胶分散过程，取得了较好的结果。一旦驱动流形成了湍流流动的状态，其湍动作用将促使溶胶喷射流波动破碎成细小的溶胶液滴，由此可采用双流喷嘴制备精细颗粒的核燃料微球，并提高其均匀性，美国 ORNL 的 R. G. Wymer 等人在 CUSP 流程上就是采用这种方法，使直径在 $0.7d_0 \sim 1.4d_0$ 范围内的微球所占的比率大于 60%（质量分数， d_0 为微球平均直径）^[7]。

最后一种方法是双流喷嘴振动分散的方法，一方面使溶胶喷射流在振动的作用下均匀分散成滴，另一方面又采用驱动流对分散形成的溶胶液滴进行保护，使之彼此分离，从而改善液滴的尺寸分布，提高其均匀性。通过控制溶胶流量、振动频率及驱动流流量可控制形成的溶胶液滴的大小，美国的 R. G. Wymer, 德国的 H. D. Ringel 及中国核动力院的曹新生等人采用这种方法控制溶胶分散过程，都取得了好结果。当溶胶流量很小、振动频率较高而驱动流流量合适时，采用该法还能改善小颗粒陶瓷核燃料微球的均匀

性，提高其尺寸合格率。美国的 R. G. Wymer 等人正是用该法使直径在 125~210 μm 范围内的微球的产率大于 90%^[5]，中国核动力院四所的曹新生、王录全等人也采用这种方法，使直径约 100 μm 的陶瓷 UO_2 微球的尺寸合格率达到 80%（质量分数）以上。

双流喷嘴振动分散的方法是控制溶胶分散过程的一种有效方法，但结构及控制过程最复杂；而双流喷嘴的结构及控制过程最简单，但控制效果要差些；单流喷嘴振动分散的方法简便易行，控制效果也较好，但对小颗粒微球的尺寸控制有一定难度。

不论单流喷嘴还是双流喷嘴，按振动的传递方式可将喷嘴分为静止喷嘴和振动喷嘴两种形式。在静止喷嘴中，喷嘴被置于静止的固定架上，振动台的振动由活塞杆通过液体传递给喷射流，美国 ORNL 的 R. G. Wymer 及中国核动力院的王录全等人采用这种方法控制溶胶分散过程。而在振动喷嘴中，喷嘴被置于振动台的传动件上，随振动台的振动而一起振动，振动通过喷嘴传递给溶胶喷射流，德国的 H. D. Ringel, Paul Naefe, 中国核动力院的曹新生及清华核能所的徐志昌等人采用这种方法控制溶胶分散过程。从文献来看，通过这两种方法都能获得好的结果。相对来说，振动喷嘴的结构更简单，振动的传递更加可靠。

如前所述，对于直径小于 200 μm 的小颗粒核燃料微球的尺寸控制，如果采用双流喷嘴，利用其中驱动流的湍动作用控制溶胶分散过程，控制参数少而简单，但效果较差；如采用双流喷嘴振动分散的方法控制溶胶分散过程，虽然效果较好，但控制参数多而复杂，分散过程难于直接观察和控制，且结果也不很理想。如果采用喷淋喷嘴，控制参数少而直接，但结果很差。因此，如果能采用单流喷嘴振动分散的方法控制溶胶分散过程，以改善小颗粒陶瓷核燃料微球的尺寸分布，从而提高其尺寸合格率，应该说方法不很复杂，但可能效果较好。根据振动分散理论，振动分散形成的均匀液滴的直径为：

$$d=(6Q/\pi f)^{1/3}$$

式中： d 为溶胶滴直径； Q 为溶胶流量； f 为振动频率。所以只要溶胶流量足够小而振动频率足够大，就可制得足够小的符合尺寸要求的均匀溶胶液滴，从而提高小颗粒陶瓷核燃料微球的尺寸合格率。但太小的溶胶流量会造成喷嘴堵塞或不能形成喷射流，使振动不能有效施加，同时，振动频率太高时，分散形成的溶胶液滴在运动过程中可能互相重叠或再次结合，而且由于振动传递的滞后性，太高的振动频率对喷射流也无效。因此，这种方法的有效性还有待实验证明。

参 考 文 献

- 1 Brambilla G, et al. Energia Nucleare, 1970, 17(4): 217~224
- 2 Hass, P. A. ORNL-TM-3978
- 3 朱永睿等. 溶胶-凝胶法制备陶瓷核燃料译文集. 北京: 原子能出版社, 1980
- 4 Huschka H, et al. IAEA-161, (1974) 37-47, Vienna
- 5 Wymer R G, et al. IAEA-161, (1974) 129-184, Vienna

- 6 Ringel H D. Juel-1258, (1975)
- 7 Hass P A. ORNL-TM-6850, (1979)
- 8 Paul Naefe, et al. Nuclear Technology, 42 (Feb. 1979) 163-171
- 9 Ringel H D, et al. Nuclear Technology, 45 (Oct. 1979) 163-171
- 10 Chihang R. Chu, et al. ORNL/MIT-337, (January, 1982)
- 11 Vaidya V N, et al. Journal of Nuclear Materials, 1987(148): 324~331
- 12 Kumar N, et al. Nuclear Technology, 1991, 96 (2): 169~175
- 13 徐志昌等. 原子能科学技术, 1990, 24 (4): 1~10
- 14 徐志昌等. 1993 核材料会议文集, 96-100
- 15 徐志昌等. 核科学与工程, 1997, 17 (1): 52~59
- 16 顾树川等. 核动力工程, 1980, 1 (2): 59~61
- 17 曹新生等. 核动力工程, 1992, 13 (2): 51~56
- 18 曹新生等. 中国专利, ZL952025183, (1995)