

文章编号: 1007-4627(2009)02-0127-09

气体喷嘴反冲传输技术及在核科学中的应用*

郭俊盛¹, 林茂盛^{1,2}, 秦 芝¹, 甘再国¹, 吴晓蕾¹, 范芳丽^{1,2},
孙锡军¹, 刘洪业¹, 罗亦孝¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 气体喷嘴反冲传输技术是继“跑兔”装置之后发展和完善起来的适合于短寿命核素研究的一种快速而有效的在线脱束方法。它能够将短寿命核反应产物传输至远离高辐射区的低本底场所进行收集和测量。该技术已在加速器和反应堆上得到了广泛的应用, 是一种研究核反应、核谱学和合成与鉴别新元素、新核素的一种不可缺少的基本实验技术和工具。描述了气嘴系统的结构、基本原理、设计要求以及它的主要特性, 特别是对系统的气体动力学机制以及各种参数对系统特性的影响等进行了讨论。最后, 综述了它在核物理、核化学以及质谱学等领域的应用情况, 并且给出了几个应用的典型例子。

关键词: 气体喷嘴; 微粒; 毛细管; 在线; 应用

中图分类号: TL8 **文献标识码:** A

1 引言

气体喷嘴反冲传输技术是继“跑兔”装置之后逐渐发展和完善起来的一种适用于短寿命核素研究的快速而地有效的在线脱束方法, 它能够将短寿命的反应产物从束流所在的高辐射场区快速地传输到远离束流的低本底区进行测量或进一步分离后再进行测量。该技术已经在加速器和反应堆上得到了广泛的应用, 是一种研究核反应、核谱学和鉴定新核素、新元素的不可缺少的基本实验技术和工具。

气体喷嘴传输技术是在20世纪60年代初由Macfarlan等^[1,2]首先创立的。之前, 他们在一次核物理实验时, 偶而发现一个充气靶室有一个漏洞, 由漏洞处逸出了大量较强的放射性, 这一偶然事件导致了后来该技术的创建。40余年来, 它被众多科学家进行了深入的研究与发展, 特别是在20世纪70年代, 关于它的结构、机制及特性等方面的研究达到了顶峰^[3-10]。至今, 已比较成熟地应用于核科学研究的各个领域。该技术中所用的毛细管的长度可以短至几厘米、长至百十米, 传输时间从毫秒

量级到秒量级, 都能快速有效地将反应产物传输至低本底处进行测量。到目前为止, 虽然对该技术中的某些机制还未研究清楚(例如, 反应产物在微粒上的吸附机制), 但并不影响它的实际应用^[11]。

图1给出了气体喷嘴传输系统的简图。它是通过一个金属窗将充气靶室与加速器的高真空管道隔离起来。离子束穿过窗箔轰击在靶上, 反应产物反冲出靶表面后在靶室(又称为热化室)被热化, 此时一种混合有微粒的气体(通常是用氦气)进入热化室, 已经热化的反应产物附着在气体中的微粒上。然后被高压气体扫出热化室, 进入毛细管传输到收集室, 气体微粒和反应产物就被撞击和吸附在一个收集箔上, 而气体则由一个大抽速的泵接连不断地排出。靶室中充入的高压气体, 一方面对反应产物起到热化(即阻止)作用, 另一方面它也作为载带和传输气体将产物传输至收集的位置, 所以在热化室和收集室之间保持一定的压力差是必要的(即在整个传输的途径中存在一个气体压力梯度), 它给气体传输提供了动力。这种结构的传输效率在初期没

* 收稿日期: 2008-10-10; 修改日期: 2009-02-12

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19475052, 19775053, 10575122, 10705035)

作者简介: 郭俊盛(1938-), 男(汉族), 河南开封人, 研究员, 博士生导师, 曾从事核探测器、探测技术、核谱学等研究, 后从事重离子物理实验、新核素合成及超重核研究; E-mail: jsguo@impcas.ac.cn

有添加微粒时是较低的,如果在气体中加入不同形式的微粒则能大大提高传输效率,一般能达到30%—90%左右,具体由系统各个部分的安排及反应产物和微粒种类所决定。另外,热化室的体积应尽量小,这样可以缩短抽空时间,从而大大缩短了传输时间。但是其体积的大小也是由对产物的热化作用决定的,即依赖于产物在气体中的射程,要有足够的空间使产物慢化后停留在其中,所以又不能太小。

所谓收集位置,是指在该位置对产物及微粒进行集中收集、测量,或经分离处理后进行测量。除收集箔可用来直接测量外,转轮收集和快带收集等也常被用来大大减少那些无用的、长半衰期产物对测量的干扰。另外,在收集位置对产物的处理是各种各样的,例如,与漏勺系统连接直接进入在线同位素分离器的离子源,或者作为时间飞行谱仪的离子源;也可在收集位置与液相或气相化学装置相连接,从而构成不同用途的快速化学分离系统等等。

自20世纪70和80年代以来,国际上知名实验室都先后建立了它们专用的气体喷嘴传输系统以及与其匹配连接的后测量系统。典型的如美国的Oak Ridge实验室、Berkeley实验室,德国的GSI实验室、Max Planck研究所,法国的Orsay实验室,加拿大的Chalk River实验室,芬兰的Jyuäsklä大学等。我国早期建造和使用气体喷嘴技术是在20世纪70年代,中国科学院近代物理研究所在国内最早建造了该传输系统。1973年,该所的科研人员使用喷嘴式充He靶室对Cf, Es和Fm同位素的 α 衰变进行了研究;后来又利用短毛细管He-jet靶室测量了C束轰击Bi产生的同位素的激发函数以及用长毛细管系统对缺中子核的 γ 谱学进行了研究^[12-14]。

2 气体喷嘴传输系统的主要结构和基本原理

2.1 主要结构及要求简介

一套较完整的气体喷嘴传输系统主要由4部分组成,即气源和微粒产生器、靶室(热化室)、毛细管以及收集室部分,如图1所示。下面分别叙述各部分的结构、原理和要求。

2.1.1 气源和微粒产生器

可用作传输气体的有He气、N₂气以及乙烯等。

要求在这些气体中的声速比较大,因而传输速度也快,当然最好的气体是H₂气,但由于其安全性不好而未被采用。目前最常用的气体是He气和N₂气。N₂气的成本虽然较低,但其传输效率和速度要比He气差好几倍,但当反应产物的产额较高,且半衰期较长时也不失为一种常用气体。在使用纯He和纯N₂时,传输效率是相当低的,需要在气体中添加一种微粒(添加剂),用来吸附反应产物,并载带着被气体传输,可以大大提高传输效率,但这种吸附机制至今尚未研究清楚。这些添加的微粒包括固体的、液体的和气体形式的都可使用。气体添加剂有CO₂、乙烯及CH₄等,液体的有油蒸汽、水蒸气、苯等,而最常用的固体添加剂有NaCl, AgCl, KBr及PbCl₂等。它们可以被加热蒸发、冷凝、雾化等而形成小液滴或固体微粒;或利用气体中的天然杂质经带电粒子束照射,形成等离子体,产生大分子块^[15];在无高电离环境时(如中子反应时),另加电弧放电或紫外光照射等。所用微粒尺寸及浓度对载带和传输起着重要作用,微粒过大时极易在传输途中沉积到毛细管壁上,过小时吸附作用不理想,最佳的微粒尺寸应控制在1 μ m左右,这可以采取必要的手段来达到。很多形式的微粒产生器曾被采用过,其中K. B. 微粒产生器和Lamer微粒产生器等都能够调节微粒的大小及均匀性^[16, 17]。

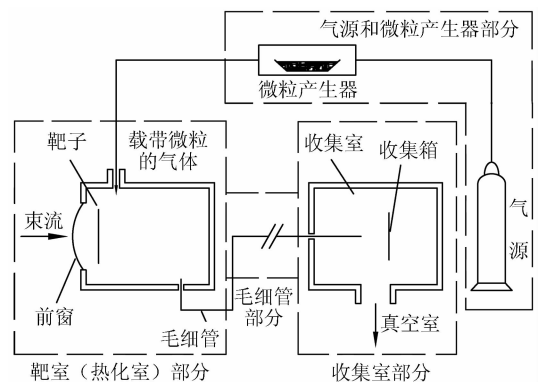


图1 气体喷嘴反冲传输系统原理简图

我们在重离子加速器上的气体喷嘴传输系统使用的微粒产生器包括一个温度在200—1000 $^{\circ}$ C可调节的管式电炉,内置一个装填有NaCl的石英舟,出口处有水冷套管。这样当He气流过时,将带着加热蒸发出来的NaCl微粒传出,并在水冷区域将大的微粒冷却沉积下来,符合要求的微粒则随气体传输至靶室部分。

2.1.2 靶室(热化室)部分

靶室用来进行核反应, 并且反应产物在此处慢化并引入毛细管入口。靶室的体积要求要尽可能小, 使室内整个体积的气体排空时间越短越好, 可以大大提高产物的传输效率和缩短传输时间; 但是, 另一方面, 靶室体积又不能太小, 它必需有足够的空间保证反应产物全部或大部分停留在其中。如前所述, 靶室必需要有一个足够的产物慢化空间, 当然这一要求也可借助调节靶室中气体的压力来达到, 但由于气体动力学的其他因素而不能完全如愿。

另外, 由于靶室内充满气体, 所以必需安装入射窗及出射窗以隔断束流管道真空及测量束流一端的法拉第筒的真空。另外, 毛细管入口端插入靶室一般约2—3 mm, 以便尽可能消除此处的涡流^[18]。

2.1.3 毛细管部分

毛细管是整个系统的关键部件之一。一般用不锈钢、聚四氟乙烯、聚乙烯等材料制成, 常用的内径为1—2 mm, 要求内径均匀、光滑、无节斑、不漏气, 且任何部位可弯曲不打折等。其长度从几厘米到几十米不等, 视其用途及场所而定。关于气体在毛细管中的气流动力学将在下节中专门叙述。

2.1.4 收集室部分

附着在微粒上的反应产物, 被气流载带着流经毛细管后, 最终进入了收集室。为了保持压力差, 它由一个低真空、大抽速的泵装置连续不断地抽气, 微粒和产物被撞击在一个收集片上并被吸附在它的表面, 而气体则被泵出。可以取出收集片直接对上面吸附的产物进行测量, 也可以将微粒和产物溶解在给定的溶液中继续进行离子交换、萃取等化学分离后再进行测量。收集室的压力较小, 一般保持在几百到上千Pa, 毛细管出口与收集片之间保持90°为最佳沉积角, 沉积效率随沉积角 θ 的 $\sin\theta$ 变化。毛细管出口与收集片的距离应大于5 mm。实验证明, 当收集室压力约为65 Pa时, 该距离为15 mm最佳, 若大于30 mm, 则沉积效率将下降。这方面的工作以及收集片表面性质与沉积效率的关系等可参看文献^[18, 19]。当然, 应该指出的是, 收集室中的沉积效率与活性产物本身的物理化学性质有关, 如气体原子及易挥发性的原子等皆不易吸附。但也有人将选择性吸附现象试图用于超快化学分离^[11]。

目前, 收集室这一部分在应用中往往被扩展和延伸, 便于按照不同目的进一步对活性产物进行处理和测量, 例如除了上面提到的进行离线的化学处理外, 大量的连接是进行在线的液相或气相的快化分离^[20—22]; 另外, 为了尽量减小在收集测量中长寿核的积累对待测短寿命核的干扰以及测量衰变曲线的需要等, 往往将简单的收集室改换为快速移动带系统, 它对测量短寿命核产物的半衰期等衰变特性特别有用。也可将收集室的毛细管出口连接一个喷嘴-漏勺装置, 使气体与反应产物尽量分离, 再与质量分离系统相连接。

2.2 气体在毛细管中的传输行为

2.2.1 毛细管中的气体动力学

将气体状态方程引入传输系统, 可得:

$$Q_M = \frac{\pi D^2 \mu P_1 v_1}{4RT_1},$$

其中, Q_M 为气体质量流率, D 为毛细管内径, μ 为气体分子量, P_1 为热化室压强, v_1 为毛细管入口处气流速度, R 为气体常数, T_1 为热化室的气体温度(可取为室温)。在不出现明显湍流情况下, 可使用尽可能大的气体流量, 以便获得较短的传输时间及较大的传输效率。根据上述基本公式, 在使用给定的气体种类情况下, 唯一可选择的是 P_1 和 D 。对于这两个参数的影响, 我们曾进行了试验研究, 发现它们的变化对传输效率的影响呈钟罩形变化趋势, 即当 P_1 增加或 D 变大时可以大大提高传输效率。但当它们增大到一定值(P_1 约为1.8个大气压, D 为1.4 mm)时, 传输效率达到最大值; 当它们继续增加时, 则效率明显呈下降趋势, 这都是由于强大的湍流出现的缘故。另外, 随 P_1 的增大, 同时也使慢化产物的射程变短, 在微粒上附着几率变小, 涡流也开始增大。但从实验中发现, 当尚未出现大的湍流情况下, D 值的增大将比 P_1 增大时具有更大的陡度来提高传输效率及缩短传输时间。因此, 使用大内径 D 的毛细管比使用大的热化室压力 P_1 的效果更佳。关于这方面的详细分析与讨论, 请参看我们早期的工作^[23]。

2.2.2 微粒在毛细管中的传输与损失^[4, 16]

(1) 微粒在毛细管中的扩散运动造成的损失 微粒可能扩散到毛细管的管壁上而附着在那里不能被传输出来而造成损失。如果微粒由于扩散可

以达到的远离毛细管中心线的平均距离为 r_d ，它与温度 T 和微粒直径 d 构成下列关系： $r_d \propto (T/d^3)^{1/2}$ 。为了尽量减少那些由于扩散而吸附在管壁上的微粒的损失，我们必须尽量满足 $r_d \ll r_0$ ，这可以通过加大毛细管的内径、降低温度以及增大微粒的尺寸来达到，但是 T 的降低没有增大微粒尺寸更有效。实验证明，使用 $0.1-1 \mu\text{m}$ 的微粒较为合适，此时它的质量单位大约是 10^8-10^{11} a. m. u范围。

(2) **重力沉积** 造成微粒向下沉积在管壁的一种损失(即所谓Stoke原理)，称为重力沉积。由于重力使微粒所移动的距离 r_g 与微粒尺寸的 $d^{3/2}$ 成正比关系，即 $r_g \propto d^{3/2}$ ，因此原则上要求微粒的尺寸越小越好，也即要求 $r_g \ll r_0$ 。当微粒尺寸减小时，可以达到重力(与 d^3g 有关)和气体粘滞力($6\pi\eta v d$)的平衡。其中， η 为粘滞系数， v 为微粒速度， d 为微粒直径。考虑到由于扩散作用的要求，我们仍可以增大微粒的尺寸而减小 r_d ，同时使 r_g 的增加可以被容忍。当然，继续增大微粒尺寸时，重力沉积的作用就变得明显了。

(3) **柏努利力(Bernoulli)力的作用** 在图2中，由于毛细管中气流的速度在管中心与边缘处是不一样的，就产生一个将微粒拉向中心的力 K_B (所谓柏努利力)，已知 $K_B \propto m^{4/3} v_0^2 r^2 \rho$ ，也即 $K_B \propto d^4 v_0^2 r^2 \rho$ ，此处， m 为微粒质量， d 是微粒直径， v_0 是毛细管中心的气体速度， r 是微粒距管轴心的距离， ρ 是气体的密度。可以看出，微粒的尺寸增加时， K_B 力也增加；在毛细管中的气流速度增大时， K_B 力也增加；微粒在管中的位置与管轴中心的距离 r 越大时， K_B 力也将变大。所以，在毛细管中产生的这种 K_B 力，对微粒的传输是有益的，它的存在大大减少了由扩散和重力沉积对微粒所造成的损失。

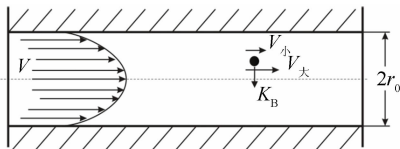


图2 层流情况下毛细管横截面上气流速度分布

(4) **其他引起微粒传输的损失因素** 当毛细管中气流的雷诺数 R_e 较高时，可能产生湍流与涡流，这是人们不希望的(将在下节较详细讨论)。因为那将造成明显的微粒损失。另外，毛细管气流的流动速度不能超过声速，否则将产生冲击波，会出现涡

流。一般可使毛细管的出口处气流达到声速，在毛细管内部的气流小于声速，使平均速度保持在 0.1 马赫(mach)左右。

2.2.3 气流在毛细管中纵向速度分布^[24]

在毛细管中(如图3)，纵向位置的气流速度分布方程如下：

$$\frac{x}{D} = \frac{1}{f} \left[\ln \left(\frac{v_1}{v} \right)^{(\nu+1)/\nu} + \frac{T_1 R_0}{M} \left(\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v^2} \right) \right],$$

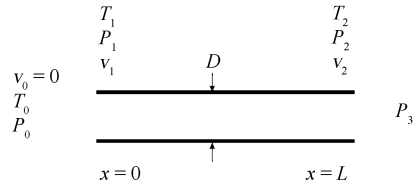


图3 毛细管各种位置的气流参数

x 是沿毛细管纵向的任一位置， v_1 是毛细管入口处的速度， v_2 是毛细管出口处的速度， v 是在 x 处的速度， D 是毛细管直径， T_1 是毛细管入口处的气体温度， f 是气体摩擦系数， ν 是比热 C_p 和 C_v 之比， R_0 是气体万能常数， P_1 和 P_2 分别是毛细管入和出口处的压强， M 是气体分子重量。在毛细管终端， $x=L$ 。

若 $P_1 \gg P_2$ ，且 $v_2 \cong v_s$ [v_s 为声速， $v_s = (\nu R_0 T / M)^{1/2}$]时，上式可简化为

$$\frac{L}{D} = \frac{T_1 R_1}{fM} \left(\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_s^2} \right).$$

再与上式比较，可得到速度与位置的简化关系式：

$$\frac{X}{L} = \left(1 - \frac{v_1^2}{v^2} \right) \left(1 - \frac{v_1^2}{v_s^2} \right)^{-1}.$$

利用这一方程，可描绘出在长度为 L 的毛细管中，气流位置与速度 v 的曲线，称为速度分布曲线(见图4)。

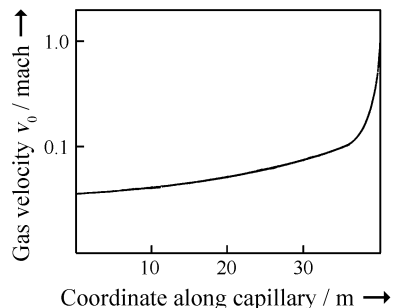


图4 气流在毛细管中沿轴线方向的速度分布

根据毛细管中的气流速度分布，若对 $x(v, v_1,$

L)积分, 可以导出气流在毛细管末端喷嘴处达到声速 v_s 时, 在毛细管内的传输时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{2Lv_s^2}{3v_1(v_s^2 - v_1^2)} = \frac{2L}{3v_1} = \frac{128\eta L^2}{3P_1 D^2},$$

其中, $\left[v_s = \frac{2\nu RT_0}{(\nu+1)\mu}\right]^{1/2}$ 而 $\nu = C_p/C_v$ 又由速度分布方程和在层流与湍流两种气流状态下的摩擦系数经验公式, 可导出:

$$v_1 = \frac{P_1 D^2}{64\eta L}, \quad (R_e \leq 2000)$$

$$v_1 = \left[\frac{RT_1 D}{0.316\mu L} \left(\frac{P_1^2 D^3 \mu}{0.316\eta^2 LRT_1} \right)^{1/7} \right]^{1/2}, \quad (R_e > 2000)$$

$R_e = 2000$ 为雷诺数的临界值 ($R_e = \rho VD/\eta$, ρ 为气体密度, R 为气体常数)

$$R_e = \frac{P_1^2 D^3 \mu}{64\eta^2 LRT_1}, \quad (\text{层流}, R_e \leq 2000)$$

$$R_e = \left(\frac{P_1^2 D^3 \mu}{0.316\eta^2 LRT_1} \right)^{4/7}, \quad (\text{湍流}, R_e > 2000)$$

$$D = \left[\frac{0.316\eta^2 LRT_1 R_e^{7/4}}{\mu P_1^2} \right]^{1/3}$$

由上面气体动力学的各种公式, 我们可以得到在层流情况下的毛细管直径 D 与长度 L 及热化室压力 P_1 , 在毛细管中的传输时间 t_0 等参数之间的关系, 可作为在实际设计传输系统时选择参数的依据。

2.3 传输时间与传输效率的确定

2.3.1 传输时间的确定

在气体喷嘴传输系统中, 反应产物的总传输时间 $t_{\text{总}}$ 实际由三部分组成: 在热化室中, 由靶子反冲出来的反应产物的热化时间, 因为这个时间很短 (10^{-8} s量级), 故可以忽略; 反应产物在热化室热化后, 随气流传输到毛细管入口处的时间 \bar{t} ; 以及产物在毛细管中的传输时间 t_0 , 所以

$$t_{\text{总}} = \bar{t} + t_0,$$

其中,

$$\bar{t} = \bar{V}_{\text{热}} / \bar{V}_1, \quad \bar{V}_1 = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 v_1,$$

而 $\bar{V}_{\text{热}}$ 为热化室体积, \bar{V}_1 为气体体积流率。确定 $t_{\text{总}}$ 的方法有两种: 一种是由理论计算, 即上述公式及以前提到的在毛细管末端达到声速时导出的 t_0 表

达式:

$$t_0 = \frac{128\eta L^2}{3P_1 D^2},$$

由此可以计算出 $t_{\text{总}}$; 另一种是从实验室中测定, 即在足够长的测量时间 T_t 内, 在毛细管末端(即收集位置)测量反应产物的放射性(如 γ 射线)计数 N , 根据放射性的衰变关系在 T_t 内对 t 进行积分, 可得

$$t_{\text{总}} = \frac{(t_{1/2})_1 \times (t_{1/2})_2}{0.693 [(t_{1/2})_1 - (t_{1/2})_2]} \ln \frac{M_2 \sigma_2 \epsilon_2 f_2 N_1}{M_1 \sigma_1 \epsilon_1 f_1 N_2}, \quad T_t \leq (t_{1/2})_{1,2}$$

这里, $t_{1/2}$ 是半衰期, M 是靶核密度, σ 是反应截面, ϵ 是探测效率, f 是 γ 射线强度, N 是 γ 计数。下标1和2分别表示通过两个反应道同时产生的两个半衰期和能量不同的 γ 射线及其对应的靶核。

下面给出一个实验中的实际例子。在用气体喷嘴传输系统传输和测量快中子轰击镁靶(即 $n + \text{Mg}$) 的产物时, 已知的条件是 $P_1 = 1.8 \text{ atm}$, $L = 30 \text{ m}$, $D = 3.4 \text{ mm}$, 使用 $\text{He} + \text{C}_2\text{H}_2$, 测量时间为 42 min , 测量了反应产物 ^{25}Na ($t_{1/2} = 59.6 \text{ s}$) 的 390 , 585 及 975 keV γ 射线, 和测量了 ^{26}Na ($t_{1/2} = 1.04 \text{ s}$) 的 1809 keV γ 射线, 测得的 $t_{\text{总}} = (1.4 \pm 0.4) \text{ s}$ 。而由理论计算得到 $t_{\text{总}} = t_0 + \bar{t} = 0.99 + 0.5 = 1.49 \text{ s}$ 。

2.3.2 传输效率的测定

气体喷嘴传输系统的传输效率依赖于热化室中热化-附着效率、毛细管的传输效率以及收集室的收集效率等。而这几种因素又是由传输气体性质、微粒添加剂的种类、热化室体积和选定的气体动力学参数决定的。另外, 传输效率与被传输核的半衰期有关, 这是不言而喻的。因此, 如果在完全相同的条件下, 测量在毛细管末端收集位置和直接在热化室靶后位置收集到的反应产物的同一种活性的计数, 它们的比值即为传输系统对该反应产物的传输效率。这种测量可以用简单的收集箔完成, 此处不再赘述。

这里值得强调的是, 毛细管直径 D 的选取对传输时间和效率的影响很大, 当 D 增加时, 毛细管中的气体流量增大, 传输时间变小并且传输效率增加, 但 D 增加到一定程度时, 气流的雷诺数超过了临界值(大约2000左右), 此时将出现大的湍流和涡流, 又将使传输速度和效率降低, 同时, D 太大时不易保持热化室的压力, 并且气体消耗量也大大增

加, 所以 D 不能无限制的增加。

3 核科学中的气体喷嘴反冲传输技术

经过20世纪70年代人们的深入研究和不断改进, 气体喷嘴反冲传输技术得到了迅速发展和应用。这种新型的在线脱束技术明显的优点是, 不需对靶子进行处理, 可以反复使用。另外就是传输时间快(在几毫秒到几秒的范围)。因此, 国外较大的核物理和核化学实验室都建立和使用了这种装置和技术。在国内中国科学院近代物理研究所引用这一技术始于20世纪70年代, 开始由短毛细管(几公分)发展到长毛细管(几十m); 靶子由单片靶扩大到多层靶; 收集部分由简单的收集箔测量发展到快带传输收集测量以及转轮收集测量系统。使用的领域包括带电粒子反应、中子反应以及重离子反应所涉及的核谱学研究、短寿命核的衰变特性测量、新核素的合成、超重核的合成和研究以及核化学领域中的液相和气相快化分离研究等, 应用范围相当广泛, 下面介绍一些典型的事例。

3.1 短寿命核的衰变特性及核谱学研究

(1) 对 $C+Bi$ 反应余核 ^{213}Fr , ^{214}Fr 及 ^{214m}Fr (半衰期为ms到s量级) 的激发函数进行了测量^[12], 对其产生机制(α 转移, 8Be 转移) 给予了实验证明。实验中使用了长度为6.5 cm和内径为0.43 mm的短毛细管, 用带有中心孔的Si(Au)面垒探测器对产物的 α 谱进行了测量。C束能量为60—72 MeV。采用He气传输, 添加剂为NaCl微粒; 靶室压力为1.29 atm, 收集室保持400—600 Pa。

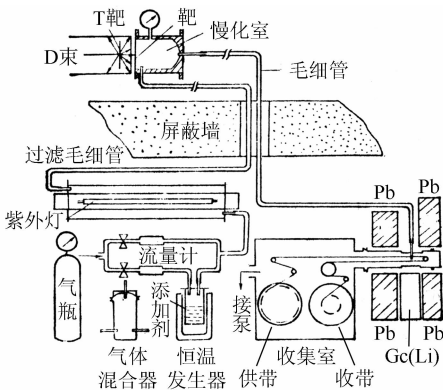


图5 气体喷嘴系统用于快中子反应产物传输和测量的装置

(2) 对 $^N Ag(^{12}C, xn)$ 弹靶组合产生的I同位素进

行了谱学及衰变特性测量^[25], 所用设备为长毛细管(10 m)及带传输系统。对 ^{115}I , ^{117}I 及 ^{118}I 的 γ 射线进行了 γ 单谱、时间序列谱及激发函数进行了测量。使用了He气加AgCl微粒作为传输气体。

(3) 用14.1 MeV的快中子轰击Al, Mg和U靶, 对反应产物的传输特性进行了系统研究。使用的是长毛细管系统, C_2H_4 为传输气体。研究了压力、内径、不同添加剂等对传输效率的影响(如图5)^[23]。对于快中子裂变产物的传输, 可参看Dautet等^[26] 的文章。

3.2 新核素的合成与鉴别研究

3.2.1 超铀缺中子新核素 ^{235}Am 的合成^[27]

通过 $^{238}Pu(p, 4n)$ 反应, 在质子直线加速器上利用35 MeV质子轰击钚靶, 采用了多靶(8片)多毛细管系统(图6), 收集箔直接收集产物, 再将产物进行快化分离, 除去大量的裂变产物, 测量产物的 γ 及X射线以及它们的符合关系。实验测得了 ^{235}Am 的半衰期为 $(15 \pm 5)min$ ^[28-31]。在此实验中, 使用了较长的毛细管(约20m, 内径2.2 mm)传输。由于质子穿过靶子降能很少, 为了提高产额, 使用了多层靶, 每两个靶片之间留有热化空间及毛细管引出, 在靶室外面再将多个引出毛细管合为一根主毛细管; 所用传输气体为He气加NaCl微粒。

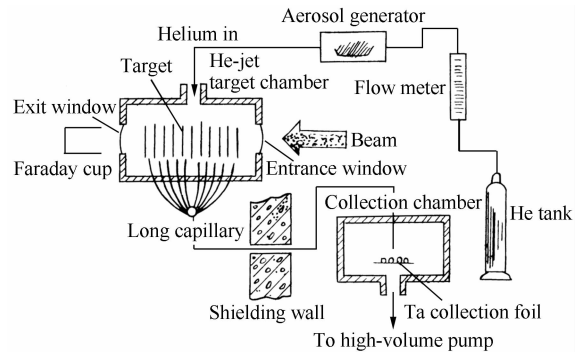


图6 合成 ^{235}Am 所用的多靶及多毛细管系统

3.2.2 轻质量区缺中子 β 延发质子先驱核的研究

使用了He-jet技术, 但在收集位置装置了可控制转动的收集盘以及 $\Delta E-E$ 带电粒子望远镜探测系统, 观测到了半衰期为ms级的 β 延发质子及 α 粒子先驱核 ^{19}Na , ^{69}Kr , ^{65}Se ^[32, 33] 的衰变现象。

3.2.3 稀土区靠近质子滴线的缺中子 β 延发质子先驱核的合成

利用氦喷嘴系统同快带传输系统的结合, 通

过 ^{36}Ar , ^{32}S 和 ^{40}Co 束轰击 ^{92}Mo , ^{96}Ru 和 ^{106}Cd , 产生了 ^{121}Ce , ^{125}Nd , $^{128, 129}\text{Pm}$, ^{129}Sm , $^{135, 137}\text{Gd}$, ^{139}Dy , ^{139}Tb , ^{142}Ho , ^{149}Yb 等十几个新的 β 缓发质子先驱核^[34], 利用 $\gamma(x)$ -p符合测量方法对核素进行分离、鉴别和测量, 分别得到了它们的半衰期及缓发质子能谱。

3.2.4 超重新核素 ^{259}Db 和 ^{265}Bh 的合成与鉴别

对于超重核的稀有事件, 当其半衰期不太短时, 也可用气体喷嘴系统传输并测量它们。超重新核素 ^{259}Db 和 ^{265}Bh 的合成和鉴别就是一个突出的例子。我们将产生的稀有事件经He气传输至收集室, 利用转轮收集-测量系统对 ^{259}Db 和 ^{265}Bh 进行了测量和鉴别。首先, 主要是对收集室转轮及探测系统作了巧妙的安排和设计(见图7)。 ^{259}Db 产物经He-jet靶室的慢化及较短毛细管的在线传输, 被收集在

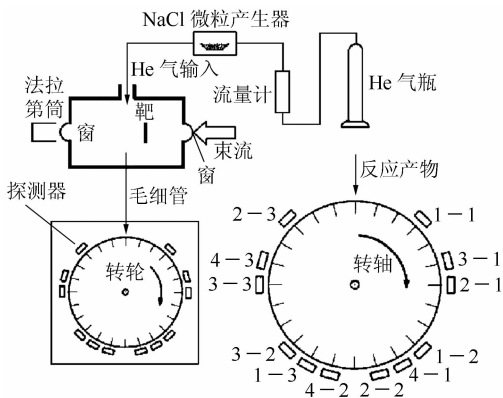


图7 合成超重核 ^{259}Db 所用的gas-jet中的收集与探测装置

一个转动轮的边缘上, 转轮的周围排列着Si(Au)面垒探测器对产物进行 α 活性测量。通过对探测器的非等间距排列以及转轮的相应的非等角度转动, 使得母核和子核的 α 活性可以被探测器分别测量, 从而获得所需要的母子体的遗传衰变关系, 达到对新核素的鉴别目的^[35]。而 ^{265}Bh 核的产生和鉴别, 前部分的He气毛细管传输是相同的, 而对收集轮收集和测量部分经过了修正和改进^[36], 几乎同美国的MG转轮系统以及德国GSI的ROMA系统相同, 借助测得的母子核遗传关系对 ^{265}Bh 进行了明确无误的鉴别, 发现了8个 ^{265}Bh 的衰变事件。

3.3 在快化分离系统对超重核的化学性质研究的应用

气体喷嘴反冲传输技术与快速化学分离系统的结合, 开辟了在线快化分离的新领域。从靶室中经

毛细管引出的反应产物可以直接溶解在溶液中进行后续的处理, 称为液相分离; 或者产物与He气经过具有温度梯度的石英管将易挥发和不易挥发的产物分离, 称为气相分离等, 这在国际上较大的核化学实验室已经广泛建立和使用。这里主要提出的是, 近几年来随着超重元素的成功合成及研究, 这种气体喷嘴传输技术与快化分离技术的结合, 非常适合进一步研究超重核的化学性质, 从而确定和验证它们在元素周期表中的位置。该领域的研究工作一般都是先从研究超重核的同族元素核的性质开始。因为超重核的产额低、半衰期短, 所以选取在线的分离及测量方法。例如, 瑞士的PSI实验室和德国GSI实验室建造的OLGA II和OLGA III及美国的Berkeley实验室的HEVI快速分离测量系统^[37], 近几年来卓有成效地研究了105号、106号及107号元素的化学性质。我们近期也建造了一台He-jet快化系统, 如图8所示, 首先用于对 ^{252}Cf 源中的与超重核同族核素Tc同位素的研究, 以便进一步研究超重核的化学性质。

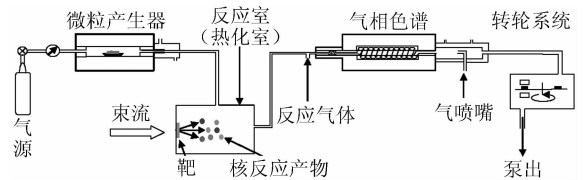


图8 气体喷嘴耦合快化分离系统

3.4 气体喷嘴传输技术在其他方面的应用

值得提出的是, 气体喷嘴传输系统与同位素分离器的耦合, 组成了在线同位素分离设备, 解决了高温难熔靶给同位素分离器带来的困难。气体喷嘴传输系统与分离器的连接主要在离子源部分, 又称为He-jet Ion Source(见图9)。因为离子源对真空度

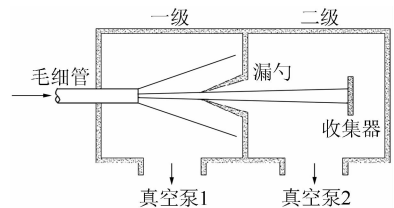


图9 喷嘴-漏勺装置示意图

的要求, 所以毛细管出口不能直接引入离子源, 需通过一个喷嘴-漏勺系统, 尽量使产物与气体分离,

然后只将产物引入离子源,以便保持离子源原有的真空度。20世纪70和80年代研究这方面耦合的文章很多,使用喷嘴-漏勺系统可以使前面毛细管出口处的 50—70 Pa的气压变成后面连接处的 10^{-2} — 10^{-4} Pa与离子源耦合^[38, 39]。

另外,一种称为在线 $\alpha(\beta)$ 反冲时间飞行谱仪也用到He-jet毛细管系统(见图10)。简单原理是,将由毛细管传输出来的产物核收集在薄膜上, $\alpha(\beta)$ 粒子发射出去,余核反冲出来飞行一定距离,根据飞行时间可以计算出核的质量,即

$$M_{r(\alpha)} = \frac{t}{L} \sqrt{2E_{\alpha} M_{\alpha}}$$

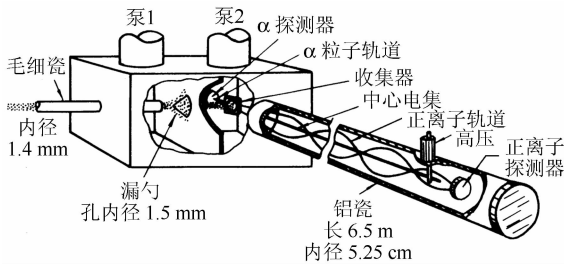


图10 He-jet技术用于时间飞行谱仪

对于 β 发射体,由于反冲能很小,并且又是连续的,必须引入外加电压加速,即可得

$$M_{r(\beta)} = 2E \left(\frac{t}{L} \right)^2,$$

这里 E 是反冲核被加速的能量,上述这种反冲时间飞行谱仪已经在美国的A&M大学、法国的Orsay以及德国的UNILAC实验室建造和使用^[40, 41]。

综上所述,气体喷嘴反冲传输技术已在核科学研究中扮演着重要角色,特别在核化学研究中,在有加速器和反应堆的实验室是一种基本的不可缺少的新型的在线脱束技术。

参考文献 (References):

[1] Macfarlane R D, Griffioen R D. Nucl Instr and Meth, 1963, 24: 461.
 [2] Friedman A M, Mohr W C. Nucl Instr and Meth, 1962, 17: 78.
 [3] Macfarlane R D, Gough R A, Oakey N S, et al. Nucl Instr and Meth, 1969, 73: 285.
 [4] Wiesehahn W J, Bischoff G, Dauria J M. Nucl Instr and

Meth, 1975, 124: 221.
 [5] Schmeing H, Koslowsky V, Wightman M, et al. Nucl Instr and Meth, 1976, 139: 335.
 [6] Wollnik H. Nucl Instr and Meth, 1976, 139: 311.
 [7] Georg E, Fab R, Lemmert P, et al. Nucl Instr and Meth, 1978, 157: 9.
 [8] Kosanke K L, Edmiston M D, Warner R A, et al. Nucl Instr and Meth, 1975, 124: 365.
 [9] Joachim, Nitschke M. Nucl Instr and Meth, 1976, 138: 393.
 [10] Macdonald J A, Hardy J C, Schmeing H, et al. Nucl Instr and Meth, 1976, 139: 355.
 [11] Kosanke K L, Edmiston M D, Warner R A, et al. Nucl Instr and Meth, 1975, 125: 253.
 [12] Guo Junsheng, Sun Xijun, Xu Xiaoji, et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1978, 2(2): 143(in Chinese). (郭俊盛, 孙锡军, 徐晓冀等. 高能物理与核物理, 1978, 2(2): 143.)
 [13] Sun Xijun, Guo Junsheng, Zhao Zhizheng, et al. Future Directions in Studies of Nuclei far from Stability. In: Hamilton J H et al. North-Holland Publishing Company, 1980, 109—113.
 [14] Zhang Tianmei, Fu Min, Wu Dingqing. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 1985, 7(2): 101(in Chinese). (张天梅, 傅民, 吴定清. 核化学与放射化学, 1985, 7(2): 101.)
 [15] Jangelas H, Macfarlane R D, Fares Y. Nucl Instr and Meth, 1971, 27(9): 556.
 [16] Wollnik H, Wilhelm H G, Röbig G, et al. Nucl Instr and Meth, 1975, 127: 539.
 [17] Wollnik H, Porstendorfer J, Röbig G, et al. Nucl Instr and Meth, 1977, 144: 247.
 [18] Mlekodaj R L, Bingham C A. Nucl Instr and Meth, 1973, 108: 13.
 [19] Zhang Tianmei, Fu Min. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 1993, 15(3): 166(in Chinese). (张天梅, 傅民, 吴定清. 核化学与放射化学, 1993, 15(3): 166.)
 [20] Puumalainen Rertti, Aysto Juha, Valli Kalevi. Nucl Instr and Meth, 1973, 112: 485.
 [21] Silva R J, Trautmann N, Zendel M, et al. Nucl Instr and Meth, 1977, 147: 37.
 [22] Aumann D E, Weismann D. Nucl Instr and Meth, 1974, 117: 459.
 [23] Luo Yixiao, Liang Zongli, Xiao Jianmin, et al. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1980, 2(4): 343(in Chinese). (罗亦孝, 梁宗礼, 肖健民等. 原子核物理, 1980, 2(4): 343.)
 [24] Weiffenbach C, Gujrathi S C, Lee J K P, et al. Nucl Instr and Meth, 1975, 125: 245.
 [25] Sun Xijun, Guo Junsheng, Zhao Zhizheng, et al. Chinese

Journal of Nuclear Physics(Materials of the Third Countrywide Nuclear Physics Conference). Lushan, Jiangxi: Chinese Nuclear Physics association, 1978, 141—143(in Chinese).

(孙锡军, 郭俊盛, 赵之正等. 原子核物理(第三次全国核物理会议资料选编). 江西庐山: 中国核物理学会, 1978, 141—143.)

- [26] Dautet H, Gujrathi S, Wieseann W J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1973, 107: 49.
- [27] Guo J, Gan Z, Liu H, *et al.* Z Phys, 1996, A355: 111.
- [28] Guo Junsheng, Gan Zaiguo, Liu Hongye, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 1996, 20(3): 286(in Chinese). (郭俊盛, 甘再国, 刘洪业等. 高能物理与核物理, 1996, 20(3): 286.)
- [29] Guo Junsheng, Gan Zaiguo, Liu Hongye, *et al.* High Energy and Nuclear Physics, 1996, 20(1): 31.
- [30] Shi Lijun, Guo Junsheng, Liu Hongye, *et al.* Chin Phys Lett, 1997, 14(4): 270.
- [31] Yang Weifan, Guo Junsheng, Mou Wantong, *et al.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1999, 24(1): 379.
- [32] Xu Xiaoji, Ma Ruichang, Huang Wenxue, *et al.* High Energy

Physics and Nuclear Physics, 1995, 19(2): 203(in Chinese). (徐晓冀, 马瑞昌, 黄文学等. 高能物理与核物理, 1995, 19(3): 203.)

- [33] Xu X J, Huang W X, Ma Rc, *et al.* Phys Rev, 1997, C55: 553.
- [34] Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, Pan Q Y, *et al.* Phys Rev, 2005, C71: 054318.
- [35] Gan Zaiguo, Qin Zhi, Fan Hongmei, *et al.* Eur Phys J, 2001, A10: 21.
- [36] Gan Zaiguo, Guo Junsheng, Wu Xiaolei, *et al.* Eur Phys J, 2004, A20: 385.
- [37] Gäggeler H W, Jost D T, Baltensperger U, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1991, A309: 201.
- [38] Ichikawa S, Asai M, Tsukata K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, 374: 330.
- [39] Moltz D M. Nucl Instr and Meth, 1981, 186: 135.
- [40] Jungclas H, Macfarlane R D, Fares Y. Radiochemical Acta, 1971, 16(3—4): 141.
- [41] Wien K, Fab R, Kasseckert E, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1977, 140: 359.

Gas-jet Recoil Transport Technique and Its Application in Nuclear Science^{*}

GUO Jun-sheng^{1,1)}, LIN Mao-sheng^{1,2}, QIN Zhi¹, GAN Zai-guo¹, WU Xiao-lei¹,
FAN Fang-li¹, SUN Xi-jun¹, LIU Hong-ye¹, LUO Yi-xiao¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The gas-jet recoil transport technique is developed and improved as a new rapid and effective on-line and off beam method following “rabbit” apparatus in the study of short lives nuclei. It can transport the short half-life nuclear reaction products far from high radioactive area for collection and measurement at low background area. This technique has been widely used in the researches with accelerator and reactor. It is indispensable basic experimental technology and tool applied to nuclear reaction, spectroscopy, as well as synthesis and identification of new elements and nuclei. The basic principle, structure, design requirement and main characteristics of gas-jet system are described in this paper, especially the mechanism of gas dynamics and the effect of several parameters on the system properties are discussed. Finally, the applications of this technique in several fields such as nuclear physics, nuclear chemistry and mass-spectroscopy etc. are comprehensively represented. Several typical applications are also illustrated.

Key words: gas-jet; aerosol; capillary; on-line; application

* **Received date:** 10 Oct. 2008; **Revised date:** 12 Feb. 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(19475052, 19775053, 10575122, 10705035)

1) E-mail: jsguo@impcas.ac.cn