

文章编号:1673-0062(2015)04-0001-06

在线同位素分离器束流光学特性研究

程品晶¹, 杨毅²

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:在线同位素分离器系统是用于研究远离 β 稳定线的短寿命核素的有效工具. 本文主要对 ISOLDE 型(55o)在线分离器的束流光学系统作了详细介绍, 通过分析影响磁铁质量分辨本领的因素, 指出把单透镜和四极透镜组合在一起使用可达到既提高分辨本领又不损失束流的要求. 此外, 根据 CARR-ISOL 的磁铁参数计算了不同影响因素下磁铁质量分辨本领及束斑水平宽度, 发现在电源稳定度越高, 加速电压越高, 离子源归一化发射度越小时, 磁铁的质量分辨率越高.

关键词:束流光学; 分析磁铁; 质量分辨本领; 单透镜; 四极透镜

中图分类号:TL92

文献标识码:B

Analysis on the Characteristic of the Beam Optics System of an On-line Isotope Separator

CHENG Pin-jing¹, YANG Yi²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The isotope separator used on-line is the most effective and powerful facility for systematically studying short-life nuclides which are far away from the line of beta stability. An introduction of the beam optics system of ISOLDE type with a 55o deflection of beam is presented in this paper. According to the factors affecting the mass resolving power of the analyzing magnet, the requirement of increasing the resolution of the system and reducing the loss of beam can be satisfied with the combination of quadruple doublets and einzel lenses. In addition, by calculating the mass resolving power of the analyzing magnet and the horizontal dimension of beam in different influence factors on the magnet of CARR ISOL, a conclusion can be drawn that the resolution of the system will be higher with better stability of the supply powers, higher voltage for accelerating and smaller normalized beam emittances.

key words: beam optics; analyzing magnet; mass resolving powers; einzel lens; quadruple doublet

收稿日期: 2015-06-01

基金项目: 湖南省科技厅重点实验室专项计划基金资助项目(2009TP4056-2)

作者简介: 程品晶(1976-), 男, 江西婺源人, 南华大学核科学技术学院副教授. 主要研究方向: 核技术及应用.

0 引言

目前国际上在对远离稳定线的短寿命核素进行系统研究的方法中,在线质量分离技术是能力最强的,也是最流行的技术^[1-4]. 该技术的本质是将短寿命核素的产生、质量分离及其性质的测量过程在时间上衔接起来. 在线同位素分离器是实现这一技术的关键性大型设备,借助它可以开展基础性的核物理研究,如核谱学研究、 Q_β 和核磁矩的测量、发现及鉴别新核素、制备放射性同位素样品等.

在线同位素分离器根据所用的分析磁铁分有非均匀场和均匀场的,根据偏转角分有 135° 、 90° 、 75° 、 60° 、 55° 、 45° 等多种型式,为增大色散,偏转半径一般都在 1 m 以上. 在线分离器常与反应堆或加速器相连. ISOLDE 型(550)在线同位素分离器^[2]是欧洲核子中心(CERN)于上世纪六十年代

末发展起来的,是国际上最早也是最著名的在线分离器之一. 它结构简单、轻巧,加工比较容易,造价低廉,性能良好,总效率高达 10%.

鉴于核衰变数据的需求背景及基础性核物理研究的需要,中国原子能科学研究院在中国先进研究堆(CARR)的长切向孔道上建造一台在线同位素分离器,所选型式为 ISOLDE 型^[5]. 本文主要针对该型式在线分离器的束流光学系统进行分析 and 讨论,同时也对如何提高在线同位素分离器的质量分辨本领进行初步探索.

1 束流光学系统

束流光学系统的传输效率,对整个在线分离器的总效率的影响是相当重要的. 若束流光学系统的参数合适,系统可以实现束流无损传输. 图 1 为 ISOLDE 型在线分离器的光路^[6].

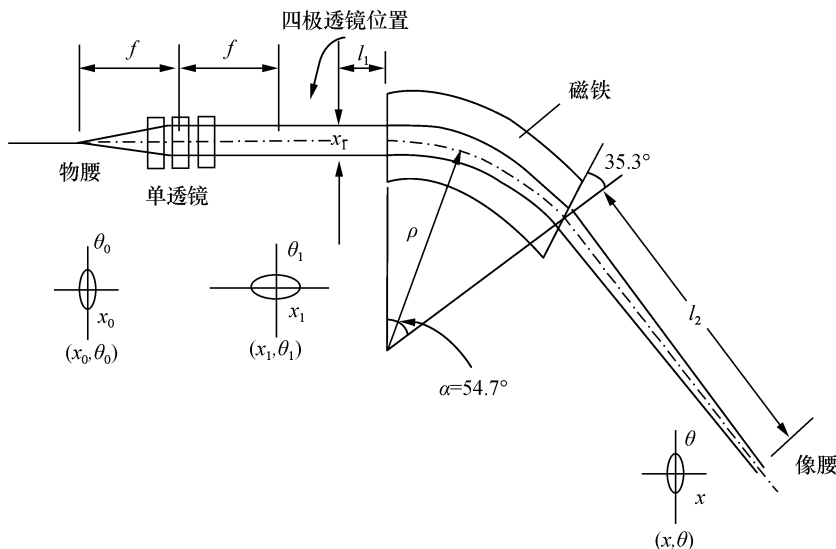


图 1 ISOLDE 型分离器束流光学系统

Fig. 1 Beam optics system of ISOLDE type isotope separator

为了在分离器的接收端能接收到足够的产物以便探测,离子束从离子源引出经加速后,依次通过一组三圆筒单极透镜和一组双四极透镜,形成很好的平行束后进入分析磁铁,在磁铁出口焦点处双聚焦成像. 考虑到电子光学是要求把像成在靶子上,而束流光学则要求把腰成在靶子上,所以成像是系统的要求,成腰是对束流的要求. 一般而言由电子光学得到的参数与从束流光学得到的

参数是有差别的. 对于 ISOLDE 型在线分离器,当进入分析磁铁的离子束为平行束时,相当于“物”在无穷远处,这样由电子光学得到的相平面位置与束流光学算出的束腰位置是一致的. 为了讨论问题方便,设扇形偏转磁铁是均匀场磁铁,其偏转角为 α ,半径为 ρ , β_1 、 β_2 分别是入口极面旋转角和出口极面旋转角,如图 2 所示.

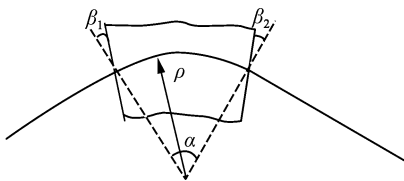


图2 ISOLDE 型分离器聚焦原理

Fig.2 Focus theory of ISOLDE type isotope separator

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_{2H} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_2}{\rho} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \rho \sin \alpha & \rho(1 - \cos \alpha) \\ -\frac{\sin \alpha}{\rho} & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_1}{\rho} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 (x_1, θ_1) 和 (x_2, θ_2) 分别是该平面内物点和像点的相空间坐标, l_1 是物距, l_{2H} 是该平面内的像距, $\frac{\Delta p}{p}$ 是物点的动量分散.由于在该平面存在色散效应,所以把 $\frac{\Delta p}{p}$ 作为一个分量补加到由 x 和 θ 组成的物点和像点的列向量中. H 是该平面内从物点到像点的总传输矩阵.

在垂直平面内有:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_{2V} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\tan \beta_2}{\rho} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \rho \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\tan \beta_1}{\rho} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} y_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)中 (y_1, ϕ_1) 和 (y_2, ϕ_2) 分别是该平面内物点和像点的相空间坐标, l_1 是物距, l_{2V} 是该平面内的像距, V 是该平面内从物点到像点的总传输矩阵.

满足双成像,且无像散时有:

$$h_{12} = 0, v_{12} = 0, \quad (\text{双成像})$$

$$l_2 = l_{2H} = l_{2V}. \quad (\text{无像散})$$

得到如下方程组:

$$\begin{cases} (\tan \beta_1 + \frac{\rho}{l_1} + \cot \alpha)(\tan \beta_2 + \frac{\rho}{l_2} + \cot \alpha) = \sin^{-2} \alpha \\ (\tan \beta_1 - \frac{\rho}{l_1} - \alpha^{-1})(\tan \beta_2 - \frac{\rho}{l_2} - \alpha^{-1}) = \alpha^{-2} \end{cases}$$

在给出 α 后, $\beta_1, \beta_2, \frac{\rho}{l_1}, \frac{\rho}{l_2}$ 四个参数中可以任意指定两个求得另外两个.例如, $\alpha = 54.7^\circ$,当 $l_1 \rightarrow \infty$ 且离子束垂直入射($\beta_1 = 0^\circ$)时,得 $l_2 = 2\rho \cot \alpha \approx \sqrt{2}\rho$, $\beta_2 = \arccot(\sqrt{2}) \approx$

考察磁铁的物—像传输特性,根据电子光学原理可知对处在偏转磁铁入口边的某一物点,将会在出口一方某处成像.下面分别给出了偏转平面和非偏转平面内,物点到像点的传输矩阵关系,若取水平平面为偏转平面,取垂直平面为非偏转平面,则在水平平面内有:

35.3° ,这是 ISOLDE 型在线同位素分离器的磁铁设计参数.

考察磁铁对束流的腰—腰传输特性,在描述束包络时引入脚标“m”,以区别于对物点、像点的描述.根据荷电粒子的传输理论,得到物腰到像腰的传输矩阵关系如下:

水平平面内:

$$\begin{pmatrix} x_{2m} \\ \theta_{2m} \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_{2Hm} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_2}{\rho} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \alpha & \rho \sin \alpha & \rho(1 - \cos \alpha) \\ -\frac{\sin \alpha}{\rho} & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta_1}{\rho} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_{1m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1m} \\ \theta_{1m} \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} = H_m \begin{pmatrix} x_{1m} \\ \theta_{1m} \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix} \quad (3)$$

垂直平面内:

$$\begin{pmatrix} y_{2m} \\ \phi_{2m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_{2Vm} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\tan \beta_2}{\rho} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \rho \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\tan \beta_1}{\rho} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_{1m} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{1m} \\ \phi_{1m} \end{pmatrix} = V_m \begin{pmatrix} y_{1m} \\ \phi_{1m} \end{pmatrix} \quad (4)$$

为满足双成腰且无像散,则需:

$$h_{11m} = 0, v_{11m} = 0, \quad (\text{双成腰})$$

$$l_{2m} = l_{2Hm} = l_{2Vm}. \quad (\text{无像散})$$

得到方程组:

$$\begin{cases} \cos\alpha + \frac{l_{2m}(\cos\alpha\tan\beta_2 - \sin\alpha) + \tan\beta_1[\rho\sin\alpha + l_{2m}(\sin\alpha\tan\beta_2 + \cos\alpha)]}{\rho} = 0 \\ 1 - \frac{l_{2m}\tan\beta_2 + [\rho\alpha + l_{2m}(1 - \alpha\tan\beta_2)]\tan\beta_1}{\rho} = 0 \end{cases}$$

当 $\alpha = 54.7^\circ$, $\beta_1 = 0^\circ$ 时, 可得 $l_{2m} \approx \sqrt{2}\rho$, $\beta_2 \approx 35.3^\circ$, 同时传输矩阵简化成:

$$H_m = \begin{pmatrix} 0 & \frac{l_{2m}}{\cos\alpha} & l_{2m}\tan\alpha \\ -\frac{\cos\alpha}{l_{2m}} & \frac{1}{\cos\alpha} - \frac{\rho\sin\alpha}{l_{2m}} & \tan\alpha + \frac{\rho(\cos\alpha - 1)}{l_{2m}} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

从上面的分析可知, 对于垂直入射的平行离子束, 从电子光学角度看是物点在无穷远, 而从束流光学角度看, 可以把这个状态作为磁铁的物腰(取 $l_{1m} = 0$), 其通过近 55° 分析磁铁后所成的像点平面或像腰是在同一位置, 即 $\sqrt{2}\rho$ 处。

为满足对不同性质核素的研究需要, 在线同位素分离器须有高分辨本领和高分离效率, 下面对此进行分析。在水平平面内, 根据式(3)和成腰条件 $h_{11m} = 0$ 有,

$$x_{2m} = h_{12m}\theta_{1m} + h_{13m}\frac{\Delta p}{p} = h_{12m}\theta_{1m} + D_H\rho\frac{\Delta p}{p} \quad (5)$$

式(5)中 $D_H = \frac{h_{13m}}{\rho}$ 是磁铁的色散系数。

由于束流既有能量分散又有质量分散, 根据磁铁的磁刚度公式 $G = B\rho = \frac{p}{q}$, 可知磁铁色散特性的本质是粒子的动量分散。由 $p = \sqrt{2mE}$, 得 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{2}(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta E}{E})$ 。如果粒子质量相同即 $\Delta m = 0$, 则 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{2}\frac{\Delta E}{E}$, 由能量分散使束流的像腰存在一个展宽的增量, 为 $\frac{1}{2}D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E}$ 。如果能量相同即 $\Delta E = 0$, 则 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{2}\frac{\Delta m}{m}$, 由粒子质量的分散使得束流的像腰平移一个距离, 为 $\frac{1}{2}D_H\rho\frac{\Delta m}{m}$ 。能量分散谱是连续的, 而质量分散是离散的, 而且偏离值较大。

如图 3 所示, 为了能分辨出质量相差 Δm 的两束粒子, 要求:

$$D_H\rho\frac{|\Delta m|}{m} \geq 2|h_{12m}\theta_{1m}| + D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E} \quad (6)$$

质量分辨率:

$$R_m = \frac{m}{|\Delta m|} = \frac{D_H\rho}{2|h_{12m}\theta_{1m}| + D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E}} \quad (7)$$

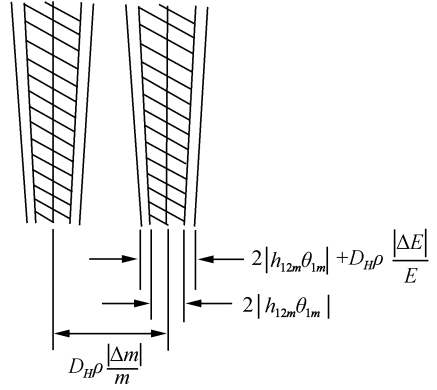


图 3 质量分辨示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mass resolving

由于束腰处的相图是正椭圆, 所以磁铁入口处束流在水平面上的发射度为 $\varepsilon_{1x} = x_{1m}\theta_{1m}$ 。假设离子源在水平面上的归一化发射度为 $\varepsilon_{0x}(E_0)^{1/2}$, 由于归一化发射度是运动守恒的, 所以 $\varepsilon_{1x} = \varepsilon_{0x}(E_0/E)^{1/2}$, 这里 ε_{0x} 是离子源的在水平面上的发射度。这样, 当离子束平行垂直入射磁铁时, 分离器的质量分辨本领为

$$R_m = \frac{D_H\rho}{2\varepsilon_{0x}\left|\frac{h_{12m}}{x_{1m}}\right|\left(\frac{E_0}{E}\right)^{1/2} + D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E}} \quad (8)$$

根据式(8)可知, 分析磁铁和离子源的发射度参数确定后, $D_H\rho$ 、 ε_{0x} 、 h_{12m} 、 E_0 、 E 均被确定, 要提高分辨率, 必须加大 x_{1m} 。从图 1 可知, 增加单透镜的焦距 f 可以使 x_{1m} 增大, 但鉴于三圆简单透镜的作用是水平方向和垂直方向对称的, 这也使得 y_{1m} 增大, 从而使离子束的纵向部分可能无法全部通过磁隙而造成束流损失。四极透镜具有独立调节功能, 因此可用一组双单元四极透镜来实现对 x_{1m} 和 y_{1m} 的调节, 达到既能提高分辨本领又不损失束流的要求。单透镜和四极透镜组合在一起使用时, 单透镜的功能不再是束流聚焦形成平行束, 而是负责将束流进一步展宽, 使束流在到达四极透镜时有足够宽度, 以便束流在四极透镜的调节下, 能形成达到分析磁铁最大接收度的束流, 从而提高磁铁的质量分辨率。有了四极透镜, 可不需要通过增加单

透镜的焦距 f 来实现增大束流宽度,所以可进一步缩短单透镜与离子源之间的距离.

2 CARR 在线同位素分离器质量分辨本领分析

1)CARR 在线同位素分离器的磁铁基本参数如下^[7]:

磁铁的偏转角: $\alpha=54.7^{\circ}$

入口极面旋转角: $\beta_1=0^{\circ}$

出口极面旋转角: $\beta_2=35.3^{\circ}$

磁铁的偏转半径: $\rho=150\text{ cm}$

磁极间隙: $g=6\text{ cm}$

磁极面宽度: $w=22\text{ cm}$

像距: $l_2=212\text{ cm}$

磁场强度: $B=4000\text{ G}$

在 80 mm 宽度范围内磁场均匀度好于 1.4×10^{-4} .

2) 质量分辨本领

作如下条件设定:离子束平行垂直入射磁铁,其最大水平半宽度 $x_{1m}=4\text{ cm}$. 取中心粒子能量 $E=40\text{ keV}$, 由于能量分散是由于电源的不稳定造成的,所以当电源的不稳定度为万分之一时,能散 $|\Delta E|/E=0.0001$, 参照文献[8]取离子源的归一化发射度 $\varepsilon_{0m}(E_0)^{1/2}=1\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}(\text{MeV})^{1/2}$.

磁铁的色散系数: $D_H=\frac{h_{13m}}{\rho}=\frac{l_{2m}\tan\alpha}{\rho}=2.0$

束斑水平宽度:

$$w=2\varepsilon_{0x}\left|\frac{h_{12m}}{x_{1m}}\right|\left(\frac{E_0}{E}\right)^{1/2}+D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E}=2(\varepsilon_{0x}E_0^{1/2})E^{-\frac{1}{2}}\frac{l_{2m}}{|x_{1m}|\cos\alpha}+D_H\rho\frac{|\Delta E|}{E}=3.19\text{ mm}$$

为了能看出 R_m 和 w 随粒子源归一化发射度 $(\varepsilon_{0m}(E_0)^{1/2})$ 、中心粒子能量 (E) 及能散 $(\Delta E/E)$ 的变化规律,根据式(8)计算,给出下表.

表 1 不同影响因素下质量分辨本领及束斑水平宽度
Table 1 Mass resolving power and horizontal width of beam spot with different affecting factors

$\Delta E/E$	E/keV	$\varepsilon_{0m}(E_0)^{1/2}/(\text{mm}\cdot\text{mrad}(\text{MeV})^{1/2})$	R_m	w/mm
0.00005	40	1π	988	3.04
		1.5π	670	4.48
		2π	506	5.93
	60	1π	1196	2.51
		1.5π	814	3.69
		2π	616	4.87
	100	1π	1518	1.98
		1.5π	1038	2.89
		2π	788	3.81
0.0001	40	1π	942	3.19
		1.5π	648	4.63
		2π	494	6.08
	60	1π	1128	2.66
		1.5π	782	3.84
		2π	598	5.02
	100	1π	1410	2.13
		1.5π	986	3.04
		2π	758	3.96
0.0005	40	1π	684	4.39
		1.5π	514	5.84
		2π	412	7.28
	60	1π	778	3.86
		1.5π	596	5.04
		2π	482	6.22
	100	1π	902	3.33
		1.5π	708	4.24
		2π	582	5.16

从表 1 数据可以看出,电源稳定度越高(能散越小),加速电压越高(中心粒子能量越高),离子源归一化发射度越小时,质量分辨率越高.

3 小 结

在线同位素分离器是人们用来实现稀有核素产生、质量分离和对衰变性质研究的大型设备^[9-10]. 其束流光学系统采用单透镜和四极透镜组合,单透镜负责将束流展宽,使束流在到达四极透镜时有足够宽度;四极透镜调节束流达到分析磁铁的最大接收度. 利用四极透镜可不用增加单透镜的焦距来实现增大束流宽度,因此缩短单透镜与离子源之间的距离. 根据分析磁铁的参数计算了不同影响因素下磁铁质量分辨本领及束斑水平宽度,所得结果表明电源稳定度、加速电压越高和离子源归一化发射度越小时,磁铁的质量分辨率越高.

参考文献:

- [1] Woo H J, Kang B H, Tshoo K, et al. Overview of the ISOL facility for the RISP[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2015, 66(3): 443-448.
- [2] Sato T K, Asai M, Sato N, et al. Development of a He/CdI₂ gas-jet system coupled to a surface-ionization type ion-source in JAEA-ISOL; towards determination of the first ionization potential of Lr ($Z = 103$)[J]. Jour-

nal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015, 303(2): 1253-1257.

- [3] Nagame Y, Toyoshima A, Tsukada K, et al. Radiochemical studies of the heaviest elements at JAEA[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 300(1): 77-88.
- [4] Kwon Y K, Choi B H, Choi C J, et al. Status of Rare Isotope Science Project in Korea[J]. Few-Body Systems, 2013, 54(7): 961-966.
- [5] 杨毅, 张春利, 朱佳政, 等. 中国先进研究堆在线同位素分离器在线调试进展[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2014(1): 79-80.
- [6] Marsh B A, Fedosseev V N, Fink D A, et al. RILIS applications at CERN/ISOLDE[J]. Hyperfine Interactions, 2014, 227(1): 101-111.
- [7] 黄业成, 王同庆, 谈锦封, 等. 兰州在线同位素分离器 ISOLAN[J]. 高能物理与核物理, 1990, 14(1): 70-75.
- [8] Nielsen B R. Improved resolving power of an isolde type isotope separator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1981, 186(1/2): 457-461.
- [9] Herlert A, Borgmann C, Fink D, et al. Effects of space charge on the mass purification in Penning traps[J]. Hyperfine Interactions, 2011, 199(1): 211-220.
- [10] Luis R, Marques J G, Stora T, et al. Optimization studies of the CERN-ISOLDE neutron converter and fission target system[J]. The European Physical Journal A, 2012, 48(6): 90-100.