

## 一器四室同位素电磁分离器研制

尹 蒙<sup>1</sup>, 李 明<sup>1</sup>, 吕银龙<sup>2</sup>, 周平原<sup>1</sup>, 符振辉<sup>1</sup>, 赵夏青<sup>1</sup>, 柴浩男<sup>1</sup>, 杜金戈<sup>1</sup>, 郭 兴<sup>3</sup>, 盛杨健<sup>3</sup>,  
王嘉谈<sup>1</sup>, 王思锐<sup>1</sup>, 万琳健<sup>1</sup>, 李镇州<sup>1</sup>, 葛 涛<sup>4</sup>, 付浩然<sup>5</sup>, 刘学锋<sup>4</sup>, 张聪敏<sup>2</sup>

- (1. 国电投核力同创(北京)科技有限公司, 北京 100086;  
2. 国核铀业发展有限责任公司, 北京 100086;  
3. 国电投核素同创(重庆)科技有限公司, 重庆 400050;  
4. 国电投核力创芯(无锡)科技有限公司, 无锡 214101;  
5. 国电投核力电科(无锡)科技有限公司, 无锡 214101)

**摘要:** 同位素自主供应对国民经济与健康中国建设意义重大, 为实现国内紧缺同位素产业化, 开展一器四室同位素电磁分离器研制。通过对离子源引出的离子束束流光学进行分析, 运用有限元方法计算磁场, 依据物理计算结果完成设备设计、制造与组装, 并进行磁场测量。结果表明, 可实现<sup>176</sup>Yb、<sup>87</sup>Rb等稳定同位素的接收, 且丰度结果较好, 表明一器四室同位素电磁分离器研制成功, 为国内紧缺同位素产业化提供了关键技术支持, 后续还需进一步优化设备性能以满足同位素产业发展需求。

**关键词:** 同位素电磁分离器; 离子源; 接收器

中图分类号: TL25+9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)03-0232-07

doi: 10.7538/tws.2024.youxian.103

## R&D of One Unit with Four Chambers Isotope Electromagnetic Separator

YIN Meng<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, LÜ Yinlong<sup>2</sup>, ZHOU Pingyuan<sup>1</sup>, FU Zhenhui<sup>1</sup>, ZHAO Xiaqing<sup>1</sup>,  
CHAI Haonan<sup>1</sup>, DU Jing<sup>1</sup>, GUO Xing<sup>3</sup>, SHENG Yangjian<sup>3</sup>, WANG Jiatan<sup>1</sup>, WANG Sirui<sup>1</sup>,  
WAN Linjian<sup>1</sup>, LI Zhenzhou<sup>1</sup>, GE Tao<sup>4</sup>, FU Haoran<sup>5</sup>, LIU Xuefeng<sup>4</sup>, ZHANG Congmin<sup>2</sup>

- (1. SPIC Nucreation Technology Company Ltd., Beijing 100086, China;  
2. State Nuclear Uranium Resource Development Company Ltd., Beijing 100086, China;  
3. SPIC Medical Isocreation Technology Company Ltd., Chongqing 400050, China;  
4. Proton and Heavy Ions Irradiation Center of SNURDC, Wuxi 214101, China;  
5. SPIC Nuelectronic (WUXI) Company Ltd., Wuxi 214101, China)

**Abstract:** The independent supply of isotopes is of great significance for the national economy and the construction of a Healthy China. To achieve the industrialization of domestically scarce isotopes. This study carried out the research and development of an isotope electromagnetic separator with four chambers. Through the analysis of the ion beam optics of the ion source, the magnetic field was calculated using the finite element method. Based on the physical calculation results, the design, manufacturing, and assembly of the equipment were completed, and the magnetic field measurement was carried out. As a result, the reception of stable isotopes such as <sup>176</sup>Yb and <sup>87</sup>Rb was successfully

achieved, and the abundance results were satisfactory. This achievement marks the successful development of the isotope electromagnetic separator with four chambers, providing key support for the industrialization of domestically scarce isotopes. It is a great significance for promoting the independent supply of isotopes, boosting economic development, and contributing to the construction of a Healthy China. In the follow-up, the performance of the equipment can be further optimized to promote the development of the isotope industry.

**Key words:** isotope electromagnetic separators; ion sources; receivers

同位素电磁分离法能适应稳定同位素的高丰度、多品种、少用量的需要,是获得 Rb、K、Gd、Ca、Cu、Sb、Er、Yb 等多种同位素主要方法<sup>[1]</sup>。<sup>177</sup>Lu 是目前广受关注的诊疗一体化核素,可以同时发射  $\beta$  粒子和  $\gamma$  射线,其中  $\beta$  粒子可以用于内照射治疗, $\gamma$  射线可以用于术后验证显像<sup>[2]</sup>。<sup>177</sup>Lu 半衰期为 6.647 d,长半衰期使得 <sup>177</sup>Lu 适合长途运输,提高了其可及性,因此,作为 <sup>177</sup>Lu 前体材料的 <sup>176</sup>Yb 需求逐年增加<sup>[3]</sup>。<sup>87</sup>Rb 因其稳定的超精细能级跃迁频率,被广泛应用于原子钟的制造,作为铷原子钟的核心材料,需求量预计将达到数百克至数公斤量级,市场规模预计在数千万至亿元量级;<sup>87</sup>Rb 同位素的另一个重要应用是在量子时频领域,随着 5G 时代的到来,以及航天、芯片钟等领域对高丰度铷同位素的需求大幅增长。

为改变同位素长期依赖进口的局面,实现 <sup>176</sup>Yb、<sup>87</sup>Rb 等同位素产业化,本研究进行一器四室同位素电磁分离器研制,主要包括束流光学设计、磁场设计、现场安装与磁场测量、同位素接收实验等,以实现紧缺同位素产品的国产化,推动同位素自主供应。

## 1 一器四室同位素电磁分离器设计

### 1.1 总体设计

电磁型同位素分离器在离子源内将同位素电离,得到的离子经过电场加速、磁场偏移方向,最终被接收器接收,并产生强度可衡量的电流。同位素的离子电荷相同但质量不同,较重的同位素在磁场方向偏移较小,使不同质量的粒子束分别打在接收器的不同口袋内,实现同位素的分离<sup>[4]</sup>。

目前国内的电磁分离器结构均为一器一室,即一台电磁分离器只有一个分离真空室,整个电磁分离器的磁回路均围绕一个分离气隙设计,电磁铁的利用率低,平均材料和能源消耗量

大。而且真空系统位于电磁分离器下方,需要双层结构建筑才能进行安装,对建筑要求高,占地面积大。

为提高电磁铁材料和运行能源利用效率,采用一器四室结构,即在一台电磁分离器的磁铁上,形成四个分离磁场气隙,在每个气隙里安装一套分离真空室,最终形成一器四室的电磁分离器主体结构。同时,真空系统与电磁分离器位于同一平面,在普通厂房内即可进行安装。

一台一器四室分离器的同位素分离产额相当于国内已有的四台一器一室分离器,大幅提高了制造分离器的磁铁材料利用效率,同步提高了能源利用效率,并减小了占地面积。一器四室电磁分离器总体参数列于表 1。

表 1 一器四室电磁分离器总体参数<sup>[5]</sup>

Table 1 Parameters of one vessel and four chambers electromagnetic separator<sup>[5]</sup>

参数	值
<b>总体方案</b>	
整体结构	立式
主真空/Pa	$1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$
色散/mm	$\geq 15$ ( <sup>176</sup> Yb)
束流相宽/mm	$\leq 5$ ( <sup>176</sup> Yb)
<b>主磁铁</b>	
磁铁类型	180°磁铁
偏转半径/mm	1 700
最高场强/Gs	3 500
电源稳定度/ppm	100
<b>离子源</b>	
离子源类型	Calutron
离子源进料	YbCl <sub>3</sub>
离子源流强/mA	$\geq 15$
引出电压/kV	40
电压稳定度/ppm	200
真空度/Pa	1~10

## 1.2 束流光学设计

为进行束流光学设计,首先需要确定坐标

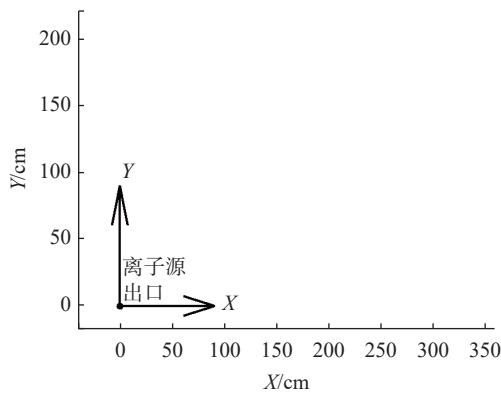


图1 束流光学设计采用的坐标系

Fig.1 Coordinate system used for beam optics design

离子源进料为  $\text{YbCl}_3$ , 离子源引出的离子包括  $\text{Yb}^+$ 、 $\text{Yb}^{2+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Cl}^+$  和  $\text{Cl}^{3+}$ 。采用多粒子进行跟踪, 出口处粒子中心平面张角为  $\pm 14^\circ$ , 高度为  $\pm 9$  cm (180 mm 高, 分离室内高 400 mm)。分离室内多粒子束流轨迹示于图 2, 从图 2 可以看出, 束流先在水平上发散, 后开始聚焦, 最终在约  $Y = -10$  cm 处形成良好的聚束效果; 在轴向上正好相反, 先聚焦后发散, 这是因为发射面的曲率半径使离子源出口束流的轴向相空间为聚束束<sup>[6]</sup>。

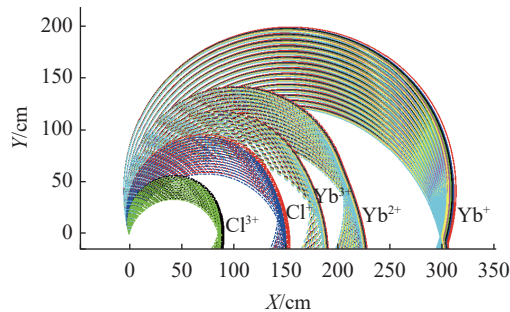


图2 分离室内多粒子束流轨迹

Fig.2 Multi-particle beam trajectory inside the separation chamber

对  $\text{Yb}^+$  来说, 存在 7 种同位素, 包括  $^{168}\text{Yb}$ 、 $^{170}\text{Yb}$ 、 $^{171}\text{Yb}$ 、 $^{172}\text{Yb}$ 、 $^{173}\text{Yb}$ 、 $^{174}\text{Yb}$  和  $^{176}\text{Yb}$ 。根据多粒子束流轨迹中  $\text{Yb}^+$  的不同同位素离子轨迹, 根据聚焦的稳定同位素束流位于接收器口袋入口处的原则, 设计接收器口袋的接收平面, 束流轨迹在接收器处的局部放大及接收平面示于图 3。

系, 根据一器四室同位素电磁分离器分离室的结构, 采用图 1 所示坐标系进行设计。

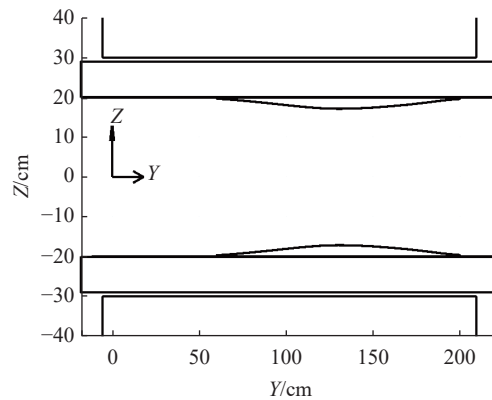


图3 束流轨迹在接收器处的局部放大及接收平面(红线)

Fig.3 Local amplification of the beam trajectory at the receiver and the receiving plane (red line)

采用 7 个口袋对 7 种同位素进行接收, 口袋内部形状为圆弧形, 曲率半径为 55 cm。接收平面上的粒子分布示于图 4, 各口袋宽度需大于束流宽度且留有余量。

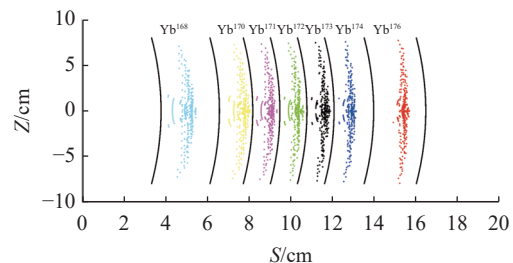


图4 接收面上的束流分布

Fig.4 Beam distribution on the receiving surface

束流光学设计要使同一种同位素束流聚焦到接收器接收口袋入口, 平面束形是指中心

平面束流的轨迹形态,空间束形是指三维空间内束流的轨迹形态。接收器位置的平面束形、空间束流和接收面束流分布示于图5,图5a、图5b显示在 $Y=-99$  mm处中心平面束流相宽为

1 mm,空间束流宽度为3 mm;图5c显示高度在 $\pm 100$  mm以内,束流形状呈一定弧度,因为接受器开口( $X=4$  mm)也应为弧面以与束流形状匹配。

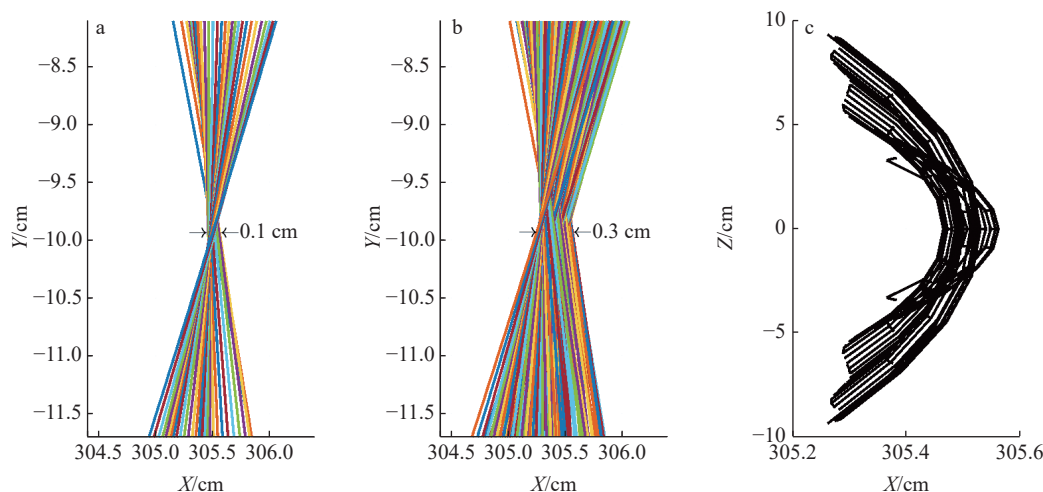


图5 接收器位置的平面束形(a)、空间束流(b)和接收面束流分布(c)

Fig.5 Planar beam shape at receiver position (a), spatial beam flow (b) and beam distribution at the receiving surface (c)

### 1.3 磁场设计

电磁分离器磁场设计的要求包括:1)针对不同质量数的同位素,在偏转后要有足够的分离距离;2)针对同一质量数的同位素,离子源出口一定张角的束流,在运动过程中要有良好的聚焦,以便在接受位置的束流相宽足够小。分离器采用一器四室结构,磁铁基本结构示于图6,包括:上盖板、上磁极、上真空盒、中磁极、下真空盒、下磁极和下盖板等;采用横向垫补方式,通过垫补单一方向的磁极面形状来形成物理所需的聚焦。

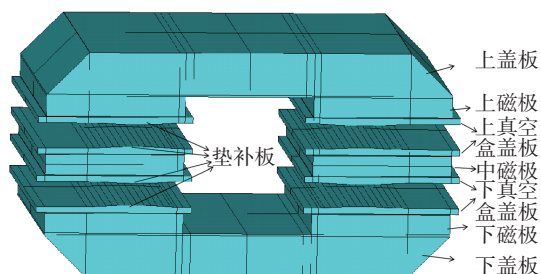


图6 磁铁结构

Fig.6 Magnet structure

建立三维有限元模型进行磁场计算。根据对称性,只需要建立1/4磁铁模型。一方面,由三维模型可以较准确计算磁场的分布,可以在

二维 Possion 模拟的基础上进一步确认磁场分布与理论计算磁场的一致性;另一主面,三维模型可以更加精确的优化磁极宽度、盖板厚度、盖板倒角尺寸,在满足磁场分布的情况下尽量减轻磁铁的总重。图7给出了有限元计算得到的磁铁中的磁场分布,此时盖板中的磁场约为1.6 T,临近饱和,考虑到实际用到磁场比这要小,此时的盖板厚度(680 mm)正合适。

$Y=50$  cm位置磁场随 $X$ 的变化( $X=0$ 为中心对称线, $X$ 轴与物理坐标 $X$ 轴不同)示于图8。由图8可知,束流轨迹的范围在 $\pm 1600$  mm范围内, $X=1600$  mm处磁场相对于中心对称线的磁场下降约为0.2%,在束流物理允许的误差范围内,而在 $X>1600$  mm位置磁场快速下降,说明此时的磁极宽度合适。

### 1.4 结构设计

根据磁铁设计结果进行结构设计,整体结构示于图9。同位素电磁分离器由主磁铁及线圈、分离室、离子源、接收器、真空系统、水冷系统、束流诊断系统、控制系统、电源系统等组成。

同位素电磁分离器分离室为四室结构,四室共用一个磁场,磁场由磁铁盖板、磁极、线圈



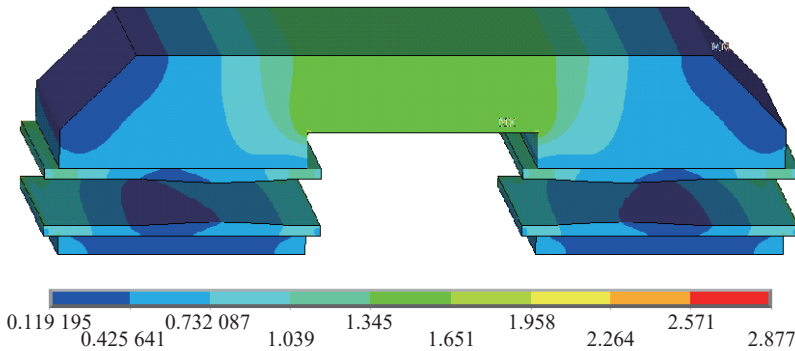


图 7 三维有限元计算磁铁中的磁场分布

Fig.7 Three-dimensional finite element calculation of magnetic field distribution in a magnet

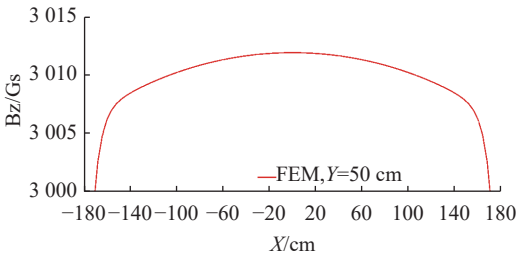


图 8 磁场随 X 值的变化

Fig.8 Variation of magnetic field with X

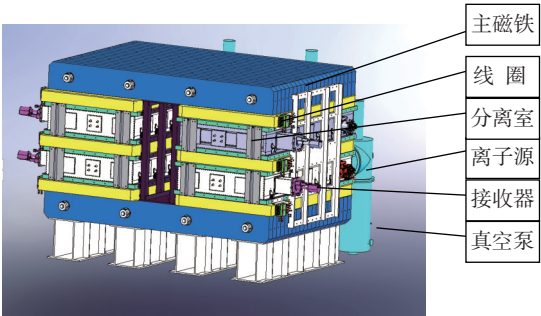


图 9 整体结构

Fig.9 The structure

等组成。四个分离室位于各磁极内,离子源与接收器安装与分离室一侧,真空系统与离子源与接收器安装面垂直,水冷系统为线圈、离子源、真空泵等设备提供冷却功率,束流诊断设备分别位于离子源出口、束流偏转 90°、接收器入口等位置,控制系统用于对整个设备进行控制,电源系统为线圈、离子源、真空设备、水冷设备等供电。

磁铁各部分受力情况列于表 2,磁铁盖板、磁极和真空盒的重量,磁铁部分(不包含线圈)重量约 430 t;上下盖板受到的磁吸力较大,约为 82 t;真空盒上下盖板为铁材料,也会受磁力作用,由于真空盒盖板上方气隙内磁场比下方

表 2 磁铁各部分受力

Table 2 Force on each part of the magnet

受力位置	数值	受力位置	数值
盖板重量/t	122	磁极间吸力/t	82
磁极重量/t	21	真空盒盖板吸力/t	~2(朝向磁极)
真空盒重量/t	15	上盖板重量/ton	6.8
总重(不含线圈)/t	430	真空盒盖板压力/t	99

气隙略大,其受到的磁吸力较小,约为 2 t。

磁铁的整体结构变形情况示于图 10,在 0.103 MPa 大气压+重力载荷边界条件下,最大变形量发生在真空室上下板之间,真空室垂直方向变形为-1.142~1.05 mm,间隙变形量为 2.2 mm<sup>[7]</sup>。

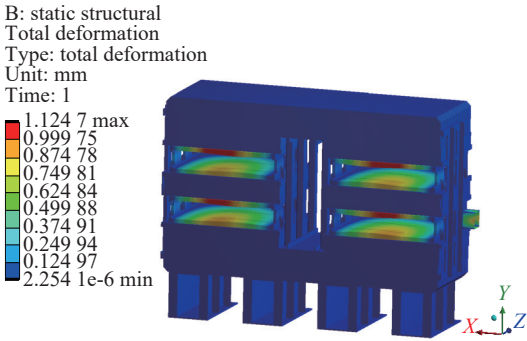


图 10 整体结构变形

Fig.10 Structural deformation

## 2 实验验证

### 2.1 磁场测量

各系统部件研制完成后,对同位素电磁分离器进行组装,组装完成后,对同位素电磁分离器的磁场进行测量,以验证磁场设计结果。磁场测量坐标系示于图 11。为一器四室结构,四个真空室内磁场理论上应该保持一致,因而对

四个分离室中同侧的两个分离室分别在大气条件下和真空条件下进行磁场测量并对测量结果进行比较。其中, $X$ 方向和 $Y$ 方向均布置有光栅尺进行位置反馈,其中 $Y$ 向较长,采用两套光

栅尺进行覆盖。采用固定 $X$ 坐标 $Y$ 向进行运动和测量的方式,为了覆盖整个 $Y$ 向磁场的测量,由两组探头进行数据采集,其中两组探头在 $Y$ 向有覆盖相同的位置,可以进行数据比对。

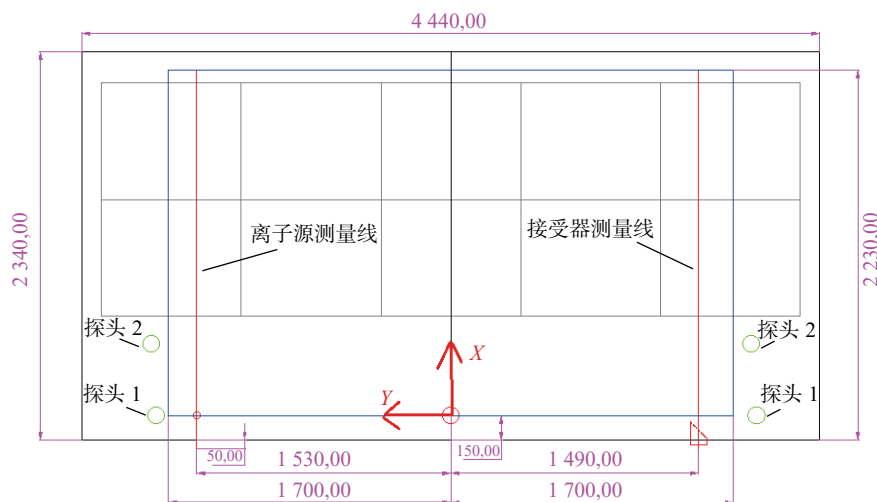


图 11 磁场测量坐标系

Fig.11 Coordinate system for magnetic field measurements

磁场测量结果示于图 12, 根据磁场测量结果, 分离室内的实际磁场与理论设计磁场吻合度较好<sup>[8]</sup>。

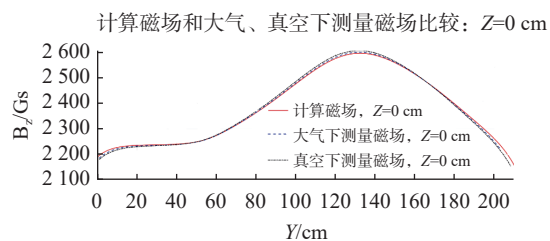


图 12 磁场测量结果

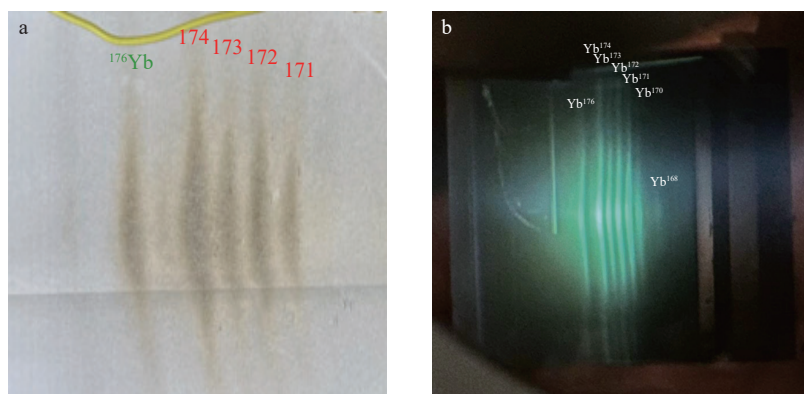
Fig.12 Results of magnetic field measurements

## 2.2 $^{176}\text{Yb}$ 接收实验

磁场测量完成后进行离子源调试, 在离子源可稳定引出束流后, 在接收器上对分离后的束流进行接收, 完成接收器打纸实验和接收实验, 结果示于图 13。根据实验结果, 接收器可以正常接收经磁场偏转后分开的 $^{176}\text{Yb}$ 束流, 证明束流物理设计正确, 偏转角度 $180^\circ$ , 偏转半径 $1.7\text{ m}$ 。对接收后的 $^{176}\text{Yb}$ 进行丰度测量, 丰度为 $97.9\%$ <sup>[9]</sup>, 经化学提取、提纯后得到 $66\text{ mg } ^{176}\text{YbCl}_3$ 。

## 2.3 $^{87}\text{Rb}$ 接收实验

在 $^{176}\text{Yb}$ 分离成功的基础上, 进行 $^{87}\text{Rb}$ 接收

图 13 接收器挡门上打纸实验(a)  $^{176}\text{Yb}$  束流接收实验(b) 结果Fig.13 Results of the paper hitting experiment on the receiver baffle door (a)  $^{176}\text{Yb}$  beam reception experiment (b)

实验， $^{87}\text{Rb}$ 束流接收实验、离子源引出电压稳定度示于图，由图14分离效果良好，离子源引出电

压稳定。对接收后的 $^{87}\text{Rb}$ 进行丰度测量，丰度为98.4%<sup>[10]</sup>，经化学提取、提纯后得到 $^{87}\text{RbCl}$  1 g。

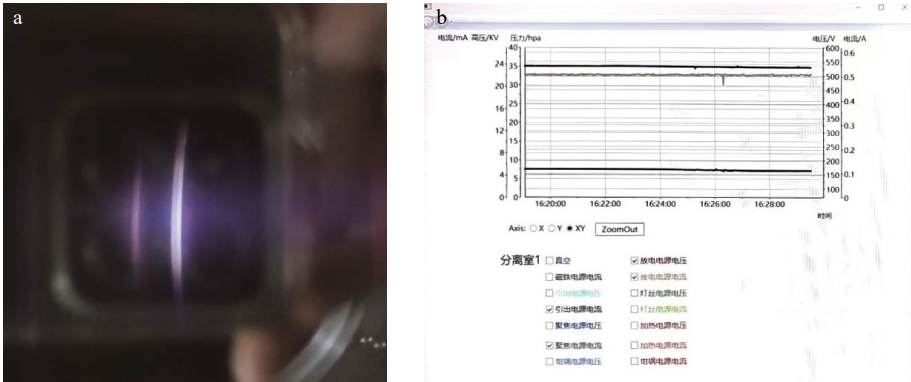


图 14  $^{87}\text{Rb}$ 束流接收实验(a)和离子源引出电压稳定度(b)

Fig.14  $^{87}\text{Rb}$  beam reception experiment (a) and stability of voltage extraction from ion source (b)

3 结论

本研究完成了一器四室同位素电磁分离器的设计、制造、组装、磁场测量，并对 $^{176}\text{Yb}$ 、 $^{87}\text{Rb}$ 等同位素进行了接收实验，经测试， $^{176}\text{Yb}$ 丰度为97.9%， $^{87}\text{Rb}$ 丰度为98.4%，标志着一器四室同位素电磁分离器研制成功。

参考文献：

[1] 肖啸菴. 同位素分离[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.  
[2] Mitra E S. Neuroendocrine tumor therapy:  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE[J]. *AJR American Journal of Roentgenology*, 2018, 211(2): 278-285.  
[3] Park H, Kwon D H, Cha Y H, et al. Stable isotope production of  $^{168}\text{Yb}$  and  $^{176}\text{Yb}$  for industrial and medical applications[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2008, 45: 111-116.  
[4] 杨国华, 曾权兴. 稳定同位素分离[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.

[5] Yin Meng. Preliminary design of an electromagnetic separator for stable isotopes [R]. Beijing: SPIC, Nucreation Technology Company Ltd., 2022.  
[6] Li Ming. Physical design of an electromagnetic separator for stable isotopes [R]. Beijing: SPIC Nucreation Technology Company Ltd., 2022.  
[7] Yin Meng. Calculation on the mechanics of the main magnet [R]. Beijing: SPIC Nucreation Technology Company Ltd., 2022.  
[8] Li Ming. Magnetic field measurements of an electromagnetic separator for stable isotopes [R]. Beijing: SPIC Nucreation Technology Company Ltd., 2023.  
[9] Du Jinge. Abundance test of  $^{176}\text{Yb}$  [R]. Beijing: SPIC Nucreation Technology Company Ltd., 2024.  
[10] Du Jinge. Abundance test of  $^{87}\text{Rb}$  [R]. Beijing: SPIC Nucreation Technology Company Ltd., 2024.