

小型活性靶时间投影室性能研究

许金艳, 阳黎升, 李奇特*, 叶沿林, 韩家兴, 白世伟, 高 见

(北京大学 物理学院 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 本文设计了使用 64 路一维读出条的小型活性靶时间投影室, 并对其性能进行了测试, 其气体室的灵敏体积为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 14\text{ cm}$, 通过连接 2 层厚气体电子倍增器进行电子放大。为改善场笼边缘的电场不均匀性, 引入场笼环的设计结构。当场笼环加高压为 -950 V 时, 测得 α 粒子沿漂移电场方向的径迹位置分辨小于 0.2 mm , 径迹角度分辨小于 0.6° , 时间分辨小于 20 ns 。活性靶时间投影室的工作气体为 $96\% \text{ He} + 4\% \text{ CO}_2$ 。实验中也观察到了清晰的 α 粒子在 He 气上的弹性散射事件。

关键词: 活性靶时间投影室; 场笼环; 漂移电场分布; 位置分辨; $\alpha + \alpha$ 弹性散射

中图分类号: TL811

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)06-1068-06

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0063

Performance Study of Small Active Target Time Projection Chamber

XU Jinyan, YANG Lisheng, LI Qite*, YE Yanlin,

HAN Jiaying, BAI Shiwei, GAO Jian

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: An active target time projection chamber (AT-TPC) was designed and its performance was tested. The chamber has an active tracking volume of $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 14\text{ cm}$, which is equipped with two layers of thick gas electron multiplier (THGEM) and connected to 64 readout strips. A guard ring was also integrated above the GEM foils in order to adjust the electric field in the gas vessel, which allowed to improve the overall performance of the system. At a guard ring HV of -950 V , the AT-TPC achieved a tracking position resolution better than 0.2 mm , an angular resolution below 0.6° and a time resolution better than 20 ns , obtained from α particles test. By using the gas mixture $96\% \text{ He} + 4\% \text{ CO}_2$ as the sensitive working gas as well as the target material, the $\alpha + \alpha$ elastic scattering events can be clearly imaged.

Key words: active target time projection chamber; guard ring; drift electric field distribution; position resolution; $\alpha + \alpha$ elastic scattering

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-04-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0404403); 国家自然科学基金资助项目(11405005)

作者简介: 许金艳(1978—), 女, 湖北钟祥人, 工程师, 博士, 粒子物理与核物理专业

* 通信作者: 李奇特, E-mail: liqt@pku.edu.cn

网络出版时间: 2020-05-26; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200525.1534.004.html>

在过去几十年里,核物理和粒子物理相关领域实验中,气体探测器被广泛用于探测实验中产生的各种粒子。这些气体探测器中较典型的类型有多丝正比室^[1-3]、阻性板气体室^[4-6]以及漂移室^[7]。20世纪70年代,尼尔森发明了一种具有出色成像能力的新型气体漂移室——时间投影室(time projection chamber, TPC)^[8]。TPC的优点在于它具有很好的位置分辨和很高的探测效率以及接近 4π 的立体角覆盖范围。因为TPC的上述优点,它很快被广泛应用于高能核物理实验的探测中^[9-12],在低能核物理实验领域也有着不少的应用^[13-15]。近年来,随着放射性核束技术的进步和发展,各种束流装置能提供越来越丰富的放射性核素束流,这为核物理研究打开了更广阔的领域。核反应实验也成为了这个领域更广泛使用的工具,如共振散射、转移反应、库仑激发和破碎反应等^[16-18]。放射性核束较稳定核束的流强弱得多,要得到同样的反应事件数需增加靶的厚度,但增大靶厚度会对反应后粒子出射角度和能量产生干扰,尤其会降低靶外部探测器对反应中产生的低能粒子的探测效率并增大反应粒子位置不确定度。

活性靶时间投影室(AT-TPC)将工作气体介质作为靶材料使用,反应点位于TPC内部,TPC可探测到入射束流和出射反应产物的径迹。这种设计可大幅提高反应产生的低能粒子的探测效率和位置、能量分辨^[19-20]。本文设计研发一种小型AT-TPC,用于不稳定核集团结构研究中低能出射粒子的测量^[18],并对其性能进行测试。

1 探测器设计和搭建

1.1 探测器结构和气体电子倍增器(GEM)膜读出

TPC本质上是1个气体探测器。当带电粒子穿过探测器的气体腔室时,沿粒子路径的气体分子将被电离。电离产生的电子在外加均匀电场(将外加电场方向定义为三维直角坐标系的 z 方向)作用下将沿 z 轴方向向阳极漂移,漂移时间由电子产生的位置与电极之间的距离决定。另一方面,电子漂移到达的阳极设计为二维平面读出(该平面与外加电场方向垂直,定

义为三维直角坐标系的 $x-y$ 平面)。根据漂移电子到达时二维读出板感应信号的位置可定位电子在 $x-y$ 平面上的位置,从而确定带电粒子径迹在 $x-y$ 平面上的投影。因此,TPC可作为带电粒子的三维成像系统探测带电粒子径迹。TPC的性能依赖于气体腔室中外加电场的均匀性、气体增益的稳定性、信号放大和读出技术等。

本文设计的AT-TPC是一简化的二维成像系统。该探测器由气体腔室、场笼和1套端盖及相关电子学读出构成,装置示意图如图1所示。场笼安装在顶部的阴极平行板和底部的读出板之间,场笼体积为 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$,场笼四周由4块相同的印刷电路板(PCB)组成,每块电路板内表面有14根平行铜条,条宽7 mm,间距3 mm,构成的漂移区长度为14 cm。基于GEM的TPC是1种具有良好位置分辨和快时间响应的新型粒子径迹探测器。底部的放大级使用2层厚GEM^[21],其灵敏面积为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,GEM膜厚 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。从2层厚GEM膜放大出来的电子在读出电路板上产生感应信号,读出条长度为100 mm、宽度为1 mm、间隔为0.562 mm,共64条。通过图2所示的电路给场笼和GEM膜加高压。本文所有测试中场笼电压设置为 $-2\text{ }700\text{ V}$,GEM膜电压设置为 -880 V 。漂移电场电势通过电路中一系列电阻实现均匀下降。两片GEM膜之间以及下层GEM膜和底部读出板之间间距均为3 mm。在场笼底部和上层GEM膜之间放

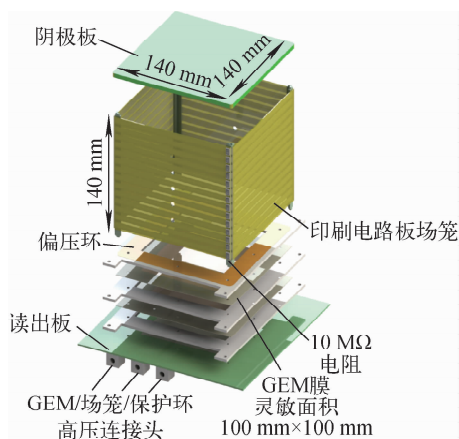


图1 AT-TPC装置示意图

Fig. 1 Schematic view of AT-TPC

置1圈由15 mm宽的铜条构成的场笼偏压环用于修正漂移电场。

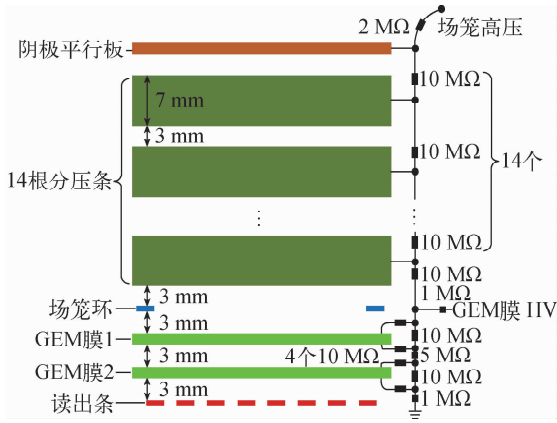


图2 场笼和GEM膜高压电路

Fig. 2 High voltage circuit for field cage and GEM foil

为对 TPC 性能进行定量分析,定义这样一个坐标系: z 轴沿漂移电场中电场方向,坐标零点位于最上层 GEM 膜表面, x 轴平行于 GEM 膜平面且垂直于一维读出条(图 2)。

1.2 工作气体

TPC 的工作气体通常需具备介电常数低、扩散系数小以及电子漂移速度较快等特性。具备这些特性的 Ar、CH₄、CO₂ 或 CF₄ 等气体及它们的混合物被广泛应用于实验测试中。不过对于 AT-TPC,工作气体同时要作为靶材料,这样气体的选择就受更多限制。设计中,因为物理目标定位在探测不稳定集团结构的母核衰变

产生的低能轻粒子碎片(如能量几 MeV 的 α 粒子),所以 He 气作为气体的主要成分理想选择。实验中采用 96% He + 4% CO₂ 混合气体,从文献[22]和实验测试均发现,少量 CO₂ 的加入有利于稳定工作气体的增益。

1.3 场笼

场笼的主体框架为一边长 14 cm 的由 PCB 构成的立方体。漂移电场由场笼顶部的平行电极板和固定于四周的分压电势条共同形成(图 1)。实际电场分布通常会在场笼边缘附近发生扭曲。漂移电场的这种变形会使 TPC 的时间和位置分辨变差。为改善漂移电场的均匀性,采用 Garfield 程序模拟了场笼内电场分布。根据计算结果,采用加场笼环[12]的方法改善场笼边缘的电场分布。场笼环固定在上层 GEM 膜上方 3 mm 处(图 2)。场笼环引出 1 个电压接口单独调节。

2 测试结果和讨论

2.1 实验设置

实验装置和信号处理电路如图 3 所示。小型 AT-TPC 放置在 1 个封闭的靶室中,实验时靶室内采用流气式气体循环,96% He + 4% CO₂ 混合气体气压为 8×10^5 Pa。在场笼外部一侧 $z = 70$ mm 处放置 α 粒子放射源 ²⁴¹Am (α 粒子能量为 5.49 MeV),通过 1 个直径 4 mm 的孔射入场笼。场笼外正对着放射源的另一侧,放置 1 个多丝正比室,用于探测 α 粒子和触发数据

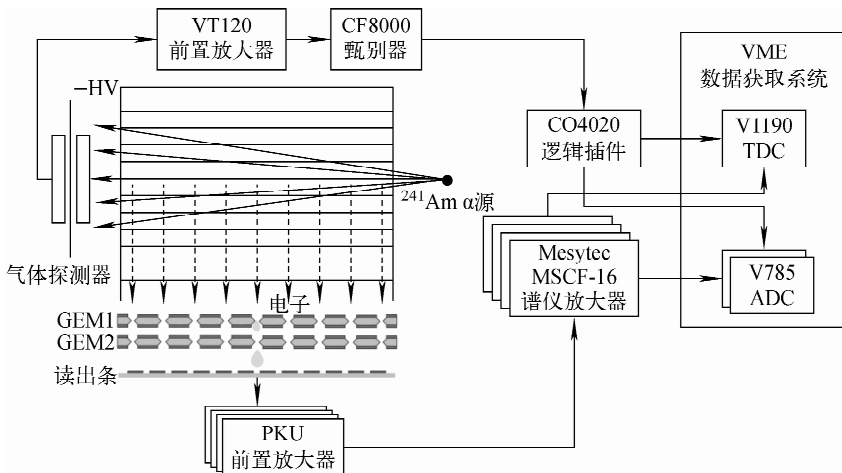


图3 实验装置和电子学示意图

Fig. 3 Diagram of experimental setup and signal processing circuit

获取系统。为对 TPC 探测器进行电子漂移速度刻度,在放射源对面侧 PCB 场笼板上 $z = 70$ mm处打出 1 个直径 4 mm 的中心孔,然后以此为中心,在 $z = 50, 60, 80, 90$ mm处打出 4 个直径为 2 mm 的刻度孔。这样只有 α 粒子穿过这几个孔的径迹可被触发记录下来。来自这几个孔的粒子的位置差和时间差,即可用于测量漂移速度。

64 路读出条得到的信号由排线引出靶室,接入北京大学亚原子粒子探测实验室研发的电荷灵敏型前置放大器。该前置放大器已多次成功用于核物理实验中^[23-24]。前放信号经过 MSCF-16 主放后的时间和能量信号分别输出到 CAEN V1190 和 CAEN V785 中记录。

2.2 α 粒子径迹测试

α 粒子穿过 TPC 的场笼产生的径迹,在 z 轴方向的位置,是由电子从产生的位置向下漂移至 GEM 放大后在读出条产生感应信号之间的时间决定的。起始时间由触发的多丝计数器给出。时间和位置对应关系的刻度通过测量 α 粒子穿过场笼与放射源正对的侧壁上的一系列等间距孔(平行于 z 轴)的径迹实现。图 4a 示出了其中 1 条 α 粒子径迹,从图 4a 可看出,当场笼环偏压为 0 时, α 粒子径迹两端出现弯曲,原因是场笼漂移电场在靠近边缘区域出现扭曲;当场笼环偏压为 -950 V 时,从实验测得的 α 粒子径迹可明显看到径迹边缘弯曲的状况得到了明显改善。图 4b 示出了当 α 粒子穿过场笼时读出条收集到的电荷信号(模数转换器(ADC)的值)。从图中也能看出场笼环对电场均匀性有明显的改善作用。在这个电压设置

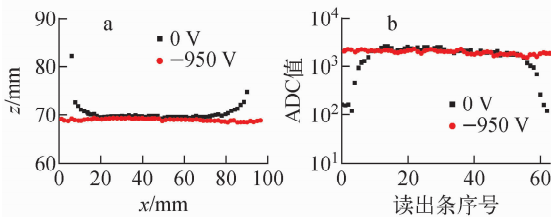


图 4 场笼环加不同高压时单个 α 粒子 $x-z$ 平面径迹和每根读出条 ADC 收集的电荷信号幅度
Fig. 4 Measured tracks of α particles in $x-z$ plane and quantity of electric charge (ADC value) collected by readout strip with different voltages applied to guard ring

下,可观察到 5 条接近直线的 α 粒子的径迹包络(图 5),分别对应 PCB 场笼上 5 个刻度孔。通过刻度孔和对面入射孔几何中心连线的位置以及每条线上实际测量的时间谱得到漂移时间的对应关系,从而可求出这个电压下电子沿 z 轴的漂移速度为 830 m/s。

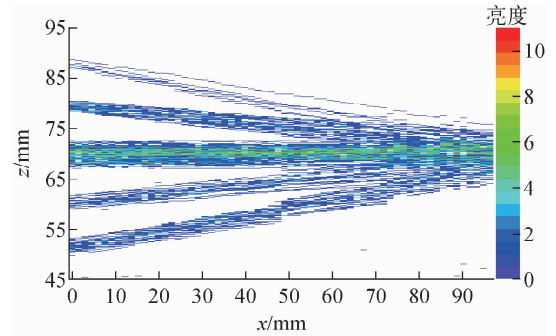


图 5 场笼环电压为 -950 V 时 α 粒子穿过场笼径迹
Fig. 5 Measured track of α particles with voltage applied to guard ring of -950 V

2.3 小型 AT-TPC 探测系统性能

通过测量 α 粒子穿过场笼得到的径迹数据,采用残差法^[25]对 64 根读出条逐条分析其沿 z 轴漂移方向的位置分辨。图 6 所示为对 64 根条的残差分布分别作高斯拟合后各自对应的标准偏差 σ_z 。从图 6 可看出, σ_z 在 $0.06 \sim 0.17$ mm 之间变化。该结果显示了该探测系统 z 轴方向很好的位置分辨能力。通过前面所述的时间-位置刻度关系可算出此系统对 α 粒子时间分辨在 $7 \sim 20$ ns 之间,不同读出条分辨能力略有差别。当然,这个时间分辨应包含了整个探测系统的测量误差,如电子漂移时间涨落、GEM 膜引起的时间误差和前放及电子学

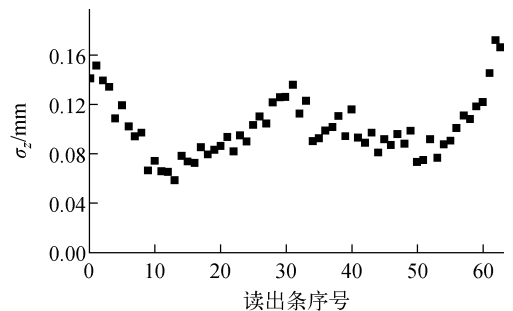


图 6 64 根读出条 z 轴方向位置分辨
Fig. 6 Position resolution along z axis for 64 strips

的噪声等。

x 轴方向的位置不确定性主要由读出条的宽度决定,根据文献[26-27]公式, $\sigma_x = 1.56 \text{ mm}/12^{1/2} = 0.45 \text{ mm}$, 本文的 1.56 mm 是 64 根一维读出条的空间排列周期间隔。

在上述 α 粒子径迹中,对每个径迹,将 64 根条得到的位置径迹分成前、后两部分,即前 32 路 ($0 \text{ mm} \leq x < 50 \text{ mm}$) 和后 32 路 ($50 \text{ mm} \leq x < 100 \text{ mm}$)。对这两部分分别进行直线拟合得到倾角 θ_1 和 θ_2 , 它们的差值 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 的分布如图 7 所示,其误差为 0.6° 。由此可看出该 AT-TPC 具有很好的角度分辨。

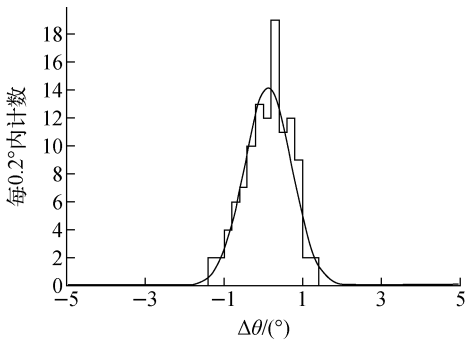


图 7 前、后两段径迹拟合角度后得到的角度差值分布

Fig. 7 Distribution of difference in track angle between upstream and downstream regions

通过这套搭建完成的 AT-TPC 探测系统,成功观察到了 α 粒子在 He 气中的弹性散射事件成像。图 8 所示为其中 1 个事件的径迹,图中蓝点表示 α 粒子从左边入射 AT-TPC 的径迹,在 $x = 17 \text{ mm}$ 处与工作气体中的 He 发生

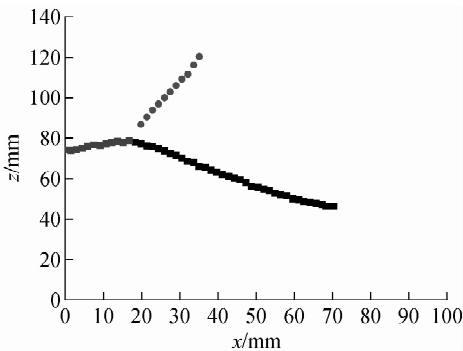


图 8 单个 α 粒子在 He 气中弹性散射的事件成像

Fig. 8 Example of $\alpha + \alpha$ elastic scattering

散射,黑点和红点对应发生弹性散射后两个出射 He 粒子的径迹。

3 结论和展望

本文设计完成了小型 AT-TPC。通过在第 1 层 GEM 膜上引入场笼环并调节到合适的电压,明显改善了漂移电场靠近场笼边缘区域的扭曲问题,从而提高了整套探测系统的性能并扩大了可用区域。AT-TPC 的时间分辨小于 20 ns , z 轴方向位置分辨小于 0.2 mm 。 x 轴方向位置不确定度由读出条排列的周期间隔决定,在本实验中结果为 0.45 mm 。通过对 $x-z$ 平面 α 粒子径迹分析,得到探测系统的角度分辨为 0.6° 。得益于这套系统良好的性能参数, $\alpha + \alpha$ 粒子弹性散射事件的成像能被清晰地观察到。测试结果表明,这套 AT-TPC 场笼和电子学的性能参数能满足对集团结构研究中产生的低能粒子的测量要求。

本文主要介绍 AT-TPC 对低能粒子径迹的二维成像。若将目前的一维读出条设计改造成二维读出块或二维读出条的设计,即能实现对低能粒子径迹的三维成像。目前高集成度的数字化波形获取系统如 XIA 获取系统或 AGET 获取系统正在发展,后期将高集成度的获取系统应用到 AT-TPC 中,有利于得到高分辨率的三维粒子径迹成像。

参考文献:

- [1] CHARPAK G, BOUCLIER R, BRESSANI T, et al. Some read-out system for proportional multiwire chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1968, 65: 217-220.
- [2] YE Y L, DI Z Y, LI Z H, et al. Study and application of low pressure multi-wire proportional chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods, 2003, 515: 718-724.
- [3] HAN L Y, LI Q T, FAISAL Q, et al. Study of a multi-wire proportional chamber with a cathode strip and delay-line readout[J]. Chinese Physics C, 2009, 33: 364-368.
- [4] FONTE P. Applications and new developments in resistive plate chambers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49: 881-887.
- [5] YING J, YE Y L, BAN Y, et al. Beam test

- results of a resistive plate chamber made of Chinese bakelites[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2001, 459: 513-522.
- [6] LI Q T, YE Y L, WEN C, et al. Study of spatial resolution properties of a glass RPC[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2012, 663: 22-25.
- [7] BLUM W, ROLANDI L. Particle detection with drift chambers[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1994: 120.
- [8] MARX J N, NYGREN D R. The time projection chamber[J]. *Physics Today*, 1978, 31: 46-53.
- [9] BRAND C, CAIRANTI G, CHARPENTIER P, et al. The DELPHI time projection chamber[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1989, 283: 567-572.
- [10] ANDERSON M, BIESER F, BOSSINGHAM R, et al. The STAR time projection chamber: A unique tool for studying high multiplicity events at RHIC[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2003, 499: 659-678.
- [11] BACHLER J, BRACINIK J, FISCHER H G, et al. Development of a TPC detector for the ALICE experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1998, 419: 511-514.
- [12] ZHENG B J, LI Y L, DENG Z Y, et al. Drift field improvement and test in a GEM-TPC prototype[J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35: 56-60.
- [13] ALKHAZOV G D, ANDRONENKO M N, DOBROVOLSKY A V, et al. Nuclear matter distributions in ${}^6\text{He}$ and ${}^8\text{Be}$ from small angle p-He scattering in inverse kinematics at intermediate energy[J]. *Physics Review Letters*, 1997, 78: 2 313-2 316.
- [14] BLANK B, HAY L, HUIKARI J, et al. A time projection chamber for the three-dimensional reconstruction of two-proton radioactivity events [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2010, 613: 65-78.
- [15] FRITSCH A, SUZUKI T, TAMII A, et al. High-resolution study of Gamow-Teller transitions in the ${}^{48}\text{Ti}({}^3\text{He}, t){}^{48}\text{V}$ reaction[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 93: 064326.
- [16] CAO Z X, YE Y L. Study of the structure of unstable nuclei through the reaction experiments [J]. *Science China Physics; Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(S1): 1-5.
- [17] YANG Z H, YE Y L, LI Z H, et al. Observation of enhanced monopole strength and clustering in ${}^{12}\text{Be}$ [J]. *Physics Review Letters*, 2014, 112: 162501.
- [18] CHEN J, LOU J L, YE Y L, et al. Elastic scattering and breakup of ${}^{11}\text{Be}$ on deuterons at 26.9 A MeV[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 93: 064620.
- [19] CAAMANO M, MITTIG W, SAVAJOLS H, et al. Resonance state in ${}^7\text{H}$ [J]. *Physics Review Letters*, 2007, 99: 062502.
- [20] BAILEY S, FREER M, CRUZ S, et al. Energy levels of ${}^{18}\text{F}$ from the ${}^{14}\text{N} + \alpha$ resonant reaction [J]. *Chinese Physics C*, 2014, 90: 024302.
- [21] SAULI F. New observations with the gas electron multiplier (GEM)[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1997, 396: 50-66.
- [22] FURUNO T, KAWABATA T, ADACHI S, et al. Development of MAIKo: The active target with l-PIC for RI beam experiments[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 569: 012042.
- [23] CAO Z X, YE Y L, XIAO J, et al. Recoil proton tagged knockout reaction for ${}^8\text{Be}$ [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 436: 012048.
- [24] JIANG W, YE Y L, LI Z H, et al. High-lying excited states in ${}^{10}\text{Be}$ from the ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{10}\text{Be}){}^8\text{Be}$ reaction[J]. *Science China Physics; Mechanics & Astronomy*, 2017, 60: 062011.
- [25] YOU H B, YANG Z H, YE Y L, et al. Construction and calibration of the multi-neutron correlation spectrometer at Peking University [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 2013, 728: 47-52.
- [26] 郑保军. TPC 探测器漂移电场的模拟研究及改进[D]. 北京:清华大学,2010.
- [27] 吕新宇. 二维 X 射线探测器(GEM)研制及性能研究[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2012.