

气体探测器发展历程及现状

常嘉豪^{1,2}, 吴子健¹, 姜世博^{1,2}, 吴志芳^{1,2}

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;

2. 核检测技术北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 气体探测器具有上百年的悠久发展历史, 为核科学与技术、粒子物理、核仪器仪表等的发展做出了突出的贡献。目前气体探测器虽然在某些应用场景中被闪烁体和半导体探测器部分替代, 但是因其具有的固有卓越特性, 在现代粒子物理研究、核工程与核技术应用中仍被大量使用(如电离室、正比管、漂移室等)。自1990年以来, 涌现出多种新型气体探测器, 又为气体探测器的发展注入新的活力。这些新型气体探测器具有高计数率、高空间分辨率、高时间分辨率和长时间稳定工作等特性, 已成为粒子物理实验研究的重要工具。此外, 新型探测器在缪子成像、中子探测等领域内也发挥着极为重要的作用。本文阐述气体探测器的发展历史与现状、基本工作原理以及研究成果, 并详细介绍气体电子倍增器和微网格气体室探测器的工作原理和应用。

关键词: 气体探测器; 微网格气体室; 气体电子倍增器; 微结构气体探测器

中图分类号: TL814 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2025)06-0608-10

doi: 10.7538/tws.2025.youxian.020

Gaseous Development History and Current State

CHANG Jiahao^{1,2}, WU Zijian¹, JIANG Shibo^{1,2}, WU Zhifang^{1,2}

(1. Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Key Laboratory on Nuclear Detection & Measurement Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: Gaseous detectors boast a development history spanning several centuries and have significantly contributed to advancements in nuclear science and technology, particle physics, and nuclear instrumentation. Although scintillator and semiconductor detectors have partially supplanted them in certain applications, gaseous detectors (e.g., ionization chambers, proportional counter tubes, and drift chambers) continue to be widely used in modern particle physics research, nuclear engineering, and nuclear technology owing to their inherent superior performance. Since the 1990s, several innovative gaseous detectors have emerged, reinvigorating the field. These novel detectors, characterized by high count rates, high spatial and temporal resolutions, and long-term stability, have become indispensable tools for experimental particle physics, a frontier area in contemporary basic science. Furthermore, they play a crucial role in muon imaging, neutron detection. This paper systematically reviews the history, current status, fundamental principles, recent research findings, and future trends in gaseous detectors, and provides a detailed introduction to two types of detectors: the gas electron multiplier and the micromegas.

Key words: gaseous detector; micromegas; gas electron multiplier; micro-pattern gaseous detectors

气体探测器是一种常用的辐射粒子探测器,其具有悠久的发展历史,在高能物理、辐射监测、医学成像、工业生产等领域中的应用十分广泛^[1-2]。气体探测器具有耐辐射、结构灵活多样、使用寿命长、环境适应性强以及性价比高优点^[3]。诞生伊始就为早期物理学的发展做出巨大的贡献,如发现宇宙射线和中子等;后续为满足不同的探测需求,迅速发展出多种类型的气体探测器,有力地推动了辐射探测技术的发展。但是,因存在一些固有的局限性,如探测效率低、能量分辨率差等,气体探测器在某些应用场景中受到了闪烁探测器、半导体探测器等探测器的冲击。目前,随着以微结构气体探测器(micro-pattern gaseous detectors, MPGD)为代表的新型气体探测器的蓬勃发展,气体探测器又焕发出新的生机^[4]。

本文回顾气体探测器的发展历史,系统介绍气体探测器的基本工作原理、结构、类型以及最新的发展成果与未来发展趋势,并重点介绍两种具有代表性的MPGD:气体电子倍增器(gas electron multiplier, GEM)和微网格气体室(micro-mesh gaseous chamber, Micromegas),对其工作原理、内部结构及应用进行总结分析,希望能够促进气体探测器的发展。

1 气体探测器的发展历史

早在十九世纪末,为便于发现和提取放射性同位素钋和镭,居里夫妇研制出了一种简易的辐射探测装置,该装置被认为是早期气体电离室的雏形。现代气体探测器起源于1908年^[2],该探测器由一个金属丝阳极和同轴圆柱形阴极组成,内部充有约5 Torr的空气或者其他气体^[5],可以实现较大的倍增系数,探测到部分初始电离电荷。1928年,Geiger和Muller共同研发出盖革计数器(geiger-mueller counter, G-M管),并成功地探测到气体中所释放的单个电子^[6]。随后的几十年,各种形状的盖革计数器和气体电离室(gas ionization chamber, GIC)涌现出来,广泛应用于辐射监测领域。然而,受限于物理尺寸等原因,其难以满足高能物理学中粒子寻迹的需求。

在上世纪50年代末,日本科学家Fukui和Miyamoto发明了第一个用于高能物理实验的火花室(Spark Chamber)^[7],紧接着在1962年缪子型中微子即被大体积的火花室发现。在火花室的基础之上,Chikovani等在1963年提出了流光室(Streamer Chamber)的概念,该型探测器适用于多粒子复杂事件的研究^[8]。

20世纪60年代,由于高能粒子物理领域的迅速发展,对于大面积辐射探测器的需求越来越迫切。1967年欧洲核子中心(CERN)的研究人员Charpak等发明了多丝正比室(multi-wire proportional chamber, MWPC)^[9],多丝正比室的出现对于粒子物理的发展产生了巨大的影响,Charpak也因此获得了1992年的诺贝尔物理学奖^[2]。基于多丝正比室所研发的各型粒子探测器迅速成为粒子物理学的强大工具^[10],之后经过不断改进完善,多丝正比室在生物学、天体物理学、核医学等领域也获得广泛应用^[11]。虽然多丝正比室取得了巨大的成功,但是其仍有一些固有缺陷,如结构过于精细、可靠性较差、制造过程十分复杂以及空间分辨率较差等^[2,12-13]。1988年劳厄-朗之万研究所(Institute Laue-Langevin, ILL)的Oed提出一种新型探测器——微条气体探测器(micro-strip gas chamber, MSGC)^[14],MSGC的定位精度可达到50 μm ,远高于MWPC。但是MSGC的可靠性很差,电子雪崩引发的意外放电会损毁探测器的阳极,因此其使用范围受到限制。

为了解决MWPC和MSGC等气体探测器存在的问题,研究人员又开始探索新型气体探测器。从上世纪90年代开始,具有新型电极结构的气体探测器不断涌现,如气体电子倍增器(gas electron multiplier, GEM)^[15]、微网格气体室(Micromegas)^[16]和厚气体电子倍增器(Thick Gas Electron Multiplier, THGEM)^[17-19]等。这些新型探测器的性能与MSGC相近,但是可靠性更高,由于采用高分辨率的光刻工艺,这些探测器统称为MPGD。MPGD的工作原理与气体雪崩探测器类似,初级电子在高电场区域内进行倍增,雪崩电荷(电子和离子)在电场中的漂移运动会在读出电极上感生出电流信号。当前,

MPGD的发展十分迅速,为满足各个应用领域的需求,还衍生出多种类型的MPGD。

近年来,气体探测器又受到了广泛的关注,许多学者仍在持续探索新的电极结构,不断提升气体探测器的相关性能。特别是MPGD,具有时空分辨能力强、能量分辨率高和便于大面积制作等优势,在工业无损检测、生物医学、地质学和考古学等领域具有巨大的应用潜力。

2 气体探测器的基本工作原理

气体探测器是指以气体作为工作介质(或探测介质)的核辐射探测器,利用入射粒子在其中的电离效应实现能量-电荷转换,进而形成电信号(电流、电压或电荷)。带电粒子入射到气体探测器中,与气体发生相互作用,沉积能量,使气体原子激发或电离,产生电子-离子对。在外加电场作用下,收集这些电子-离子对,可形成电信号,从而实现对带电粒子的探测(计数或能量测量)。至于对中性粒子(即不带电粒子)的探测,通常分为“能量传递”和“能量沉积”两个过程:入射粒子先与气体发生相互作用,产生次级带电粒子,并把能量全部或部分转移给次级带电粒子;次级带电粒子再使气体电离,从而实现对中性粒子的探测。对于特定的电极结构,当 α 粒子和 β 粒子入射时,实际收集到的电荷数 N 与外加电压 V 的关系示于图1。

根据外接电压的不同,图1中的曲线可以分为6个工作区域:复合区、饱和区、正比区、有限正比区、盖革区和连续放电区。在不同区域内,入射粒子与工作气体的作用机制不尽相

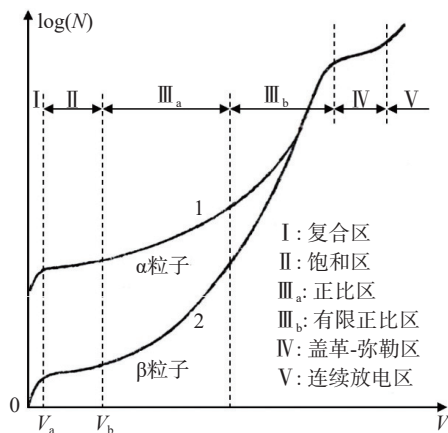


图1 收集的电荷数 N 与外加电压 V 的关系

Fig.1 Number of collected ions vs external voltage

同,由此衍生出多种形式的气体探测器,如电离室、正比计数管、盖革管等^[20]。

自上世纪60年代开始,闪烁体探测器和半导体探测器的快速发展,使得气体探测器在某些应用场景被取代。20世纪末,研究人员提出了MPGD的概念,这些新型气体探测器具有极为出色的性能,在多个领域内得到了广泛应用。下面将对MPGD进行详细介绍。

3 MPGD工作原理

3.1 GEM工作原理

受多级雪崩室的启发,GEM于1997年被Sauli等^[15]发明,最初是为了粒子物理实验而开发,之后经过几十年的发展,GEM在多个领域内都有广泛应用。GEM是一种基于气体雪崩放大原理的气体探测器,如图2所示,其主要由漂移电极、GEM电极和电子收集极等组件组成。GEM电极是一种双面附有金属涂层的复合薄膜层,薄层存在着均匀分布的小孔,孔径一般为70~140 μm ^[21]。GEM电极位于漂移电极和收集电极之间,上下金属涂层的电势差会在孔内产生极高的电场,场强为50~70 kV/cm。当入射粒子在漂移区内产生电子、离子,在外部电场的作用下,电子会进入GEM的微孔通道中,在通道中电子会在加速的同时发生雪崩,生成的部分电子会向收集电极漂移直至被吸收。GEM的信号仅有雪崩电子的参与,因此响应时间很快^[21]。

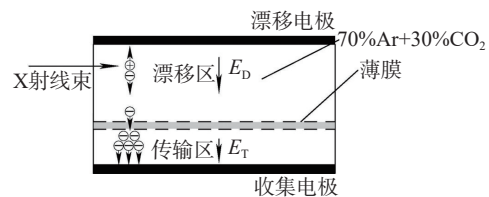


图2 GEM工作原理示意

Fig.2 Schematic diagram of the working principle of GEM

GEM探测器具有诸多优点:可以制作大面积探测器;计数率高,可以达到 10^7 Hz/mm²;信号收集速度快,无离子信号的“长尾”;倍增系数大,单级GEM放大倍数一般为100,三级GEM的倍增系数可以达到 10^5 量级^[22];良好的空间分辨能力(优于10 μm)与时间分辨能力

(约 10 ns)。之后,在 GEM 探测器的基础之上,新型的先进气体探测器又不断涌现出来,如 WELL^[23]、THGEM^[24]、THWELL、RWELL、 μ -RWELL^[25]、Groove^[26] 等。

3.2 Micromegas 探测器工作原理

针对传统微条气体室(micro-strip gas chamber, MSGC)存在的阳极易受放电损伤的可靠性问题,1996年 Giomataris 等^[16]提出了 Micromegas 探测器。Micromegas 探测器是一种两级的平行板雪崩室,薄金属微网电极将探测器内区域分为了漂移区域与放大区域,依靠不对称设计可以实现放大区的高电场(40~60 kV/cm)与漂移区的低电场(约几百 V/cm)。放大区域的间隙十分狭窄,通常为几十至一百微米,根据不同的探测需求,漂移区域的宽度一般为毫米或者厘米量级^[27-29]。图 3a 是 Micromegas 探测器的工作

原理,当粒子进入探测器漂移区时,会在其中沉积能量生成电子和离子。在电场的作用下,电子会向微网漂移,进入放大区发生雪崩放大,生成的电子因为穿过网孔的电场线为漏斗状而进入放大区域,阳极所得到的感应信号为电子信号(ns)与较慢的离子信号(100 ns)组成^[30]。如图 3b 所示,阳极与微网之间放置了大量的绝缘支柱,保证了放大区域的均匀性,方便制作大面积探测器^[13]。Micromegas 探测器概念简单,具有诸多优点:(1)优异的空间分辨能力,可以实现 12 μm 空间分辨能力^[31];(2)出色时间分辨能力,在 NA48 实验中的 KABES 中的束流谱仪实现了小于 1 ns 的时间分辨能力^[32];(3)便于大面积制作,可以实现 1 m \times 1 m 的有效面积;(4)可以长时间稳定工作且探测器增益高($10^4\sim 10^6$)^[29]。

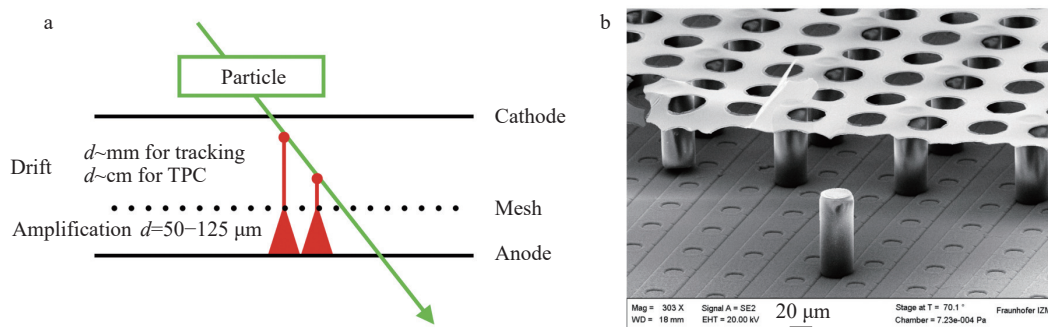


图 3 Micromegas 探测器工作原理(a)和微网的微观结构(b)^[27]

Fig.3 Working principle of Micromegas detector (a) and microstructure of the micromesh (b)^[27]

Micromegas 探测器中最为重要的结构即是微网,根据制造工艺与应用场景的不同,一般将微网的制作工艺分为三类:(1)薄金属片所制成的平面金属网格,微孔采用化学腐蚀等方法生成;(2)通过机械装置将不锈钢丝编织成微网,金属丝的直径通常为 18 μm ;(3)使用特定技术如光刻蚀形成微网,如 Bulk Micromegas^[33]和 InGrid^[34]技术。

4 探测器应用

4.1 基于 MPGD 的径迹探测技术

Micromegas 探测器因其优异的空间分辨率和低成本特性,在粒子物理实验中被广泛用作径迹探测器。在 COMPASS 实验中, Micromegas 探测器被用作大面积径迹探测器,以实现束

流粒子的二维定位^[13],其由 12 个相同的 Micromegas 探测器组成,单个探测器的有效面积为 40 cm \times 40 cm^[35],实现了优于 100 μm 空间分辨能力^[36]。后续升级版本的 COMPASS 探测器采用光刻蚀一体化工艺制备的 Bulk Micromegas 探测器,其具有优异的性能,系统的空间分辨率提升至 70 μm ,同时实现了优于 10 ns 的时间分辨能力^[37]。CLAS12 实验所用的顶点定位器正是基于 Micromegas,其包括前向探测器 FMT(forward micromegas tracker)和桶状探测器 BMT(barrel micromegas tracker),BMT 由六层圆柱形探测器组成,FMT 由六个直径 450 mm Micromegas 探测器组成^[38]。在 LHC 升级项目中,阻性 Micromegas 探测器被用于 ATLAS 的缪子谱仪中,以取代无法满足需求的探测器。在这次升级中, Micromegas

模块将会和 STGC 模块一起安装到 NSW (New Small wheel) 中作为精密测量仪器^[39]。与 Micromegas 相似, GEM 探测器也可用于径迹探测器, COMPASS、TOTEM、KOLE-2 以及 CMS 均使用了 GEM 结构作为径迹探测器^[13]。

4.2 基于 MPGD 的时间投影室读出技术

时间投影室 (time projection chamber, TPC) 探测器可以给出灵敏体积内复杂事件的三维图像, 其倍增级又称为读出探测器^[40], 早期多采用 MWPC^[40-41], 后续逐渐被新性能优异的 MPGD 替代。2004 年 Kappler 等^[42] 研制出用于国际直线对撞机 (ILC) 的双 GEM 读出 TPC 原型, 实现了 $(63 \pm 3) \mu\text{m}$ 的空间分辨率。后续研究通过优化工作气体配比、读出电极几何参数等关键技术, 进一步提升了探测器性能^[43-44]。2016 年张余炼等^[45] 综合 GEM 和 Micromegas 的优点, 提出了 GEM-MM 的读出方案。早期 ALICE-TPC 使用 MWPC 作为读出探测器, 在第三期升级中被多级级联 GEM 替代^[46]。中国 CSR 外靶实验 (CSRExternal-targetExperiment, CEE) 的 TPC 也将采用 GEM 读出的方式, 中科院近物所已经研制出相关原型机并进行测试^[47]。基于 Micromegas 的读出方案在中微子振荡实验 T2K 和天体物理实验 HARPO MICROMEGAS TPC 中已经得到应用^[48]。此外, Micromegas-TPC 开始逐渐应用于低本底事件探测, 如 CAST、TRES-DM、PandaX-III^[49-50]。

4.3 基于 MPGD 的中子探测技术

4.3.1 基于 GEM 的中子探测技术 GEM 探测器通过耦合不同的中子转换材料即可实现对中子的探测, 国内外多家研究机构已经进行了相关研究。2010 年德国海德堡大学开发了一种基于涂硼 GEM 的中子探测器 CASCADE^[51]。图 4 为 CASCADE 探测器的结构示意图, 探测器采用对称结构设计, 上下各有 3 层 GEM 电极, 2 层 GEM 电极双面涂硼, 气体增益略大于 1, 最后一层 GEM 电极单面涂硼, 气体增益为 10~30。该探测器的有效面积为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 可实现 2.6 mm (FWHM) 的空间分辨能力和 1 MHz 的计数率^[51-52]。2012 年日本 KEK 也提出一种多层堆叠涂硼 GEM 方案, 对热中子的探测效率为 30%, 且具有 0.5 mm 的空间分辨能力^[53]。2013 年 Croci 等^[54] 设计了包含 3 层 GEM 和涂有 $1 \mu\text{m}$ 厚

的 B_4C 的铝制阴极的中子束监测装置, 实现了 1% 的热中子探测效率。

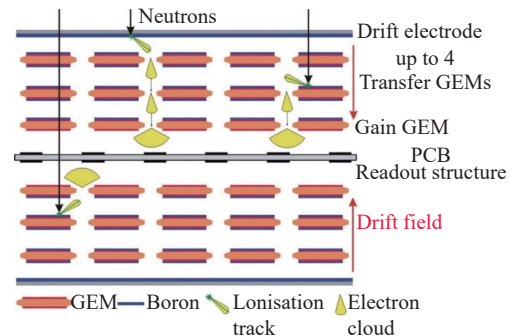


图 4 CASCADE 结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of CASCADE

意大利核物理国家实验室 (Istituto nazionale di fisica nucleare, INFN) 创造性地提出了 S-GEM (Side-On GEM) 结构。如图 5 所示, 该探测器通过多层涂硼玻璃转换层与 3 层 GEM 的协同作用, 实现了对热中子 ($E=5.11 \text{ MeV}$) 30% 的探测效率^[55]。2018 年 Muraro 等^[56] 提出一种与 S-GEM 结构相似的探测器 BAND-GEM (Boron Array Neutron Detector GEM), BAND-GEM 由三维网格中子转换层和三层 GEM 组成, 中子转换层由 24 个网格堆叠而成, 表面涂有 $0.59 \mu\text{m}$ 厚的 B_4C , 其对热中子 ($E=5.11 \text{ MeV}$) 的探测效率提升至 50%。此外, Pfeiffer 等^[57-58] 开发的 Gd-GEM 探测器, 通过三层 GEM 和 $250 \mu\text{m}$ 钆阴极组合, 实现了对热中子 ($E=13.0 \text{ MeV}$) 10% 的探测效率。

国内关于 GEM 中子探测器的研发起步较晚。依托于中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS), 中科院高能所自 2009 年系统开展 GEM 中子探测器研究^[59]。为摆脱进口 GEM 膜的限制, 2013 年高能所推出专用于中子探测的陶瓷基材 GEM^[60]。2016 年高能所成功研制出 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的中子束流探测器, 对热中子的探测效率为 0.09% ^[61]。受 CASCADE 启发, 2020 年高能所推出的多层涂硼 GEM 探测器将有效面积扩展至 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 空间分辨率优于 $(2.94 \pm 0.01) \text{ mm}$ (FWHM), 并将探测效率提升至 54% ^[62]。针对空间分辨率提升难题, Yang 等^[63] 提出在 B_4C 中子转换层下方引入钛阻挡层的方案。2022 年, Zhou 团队开发的密闭型高温陶瓷 GEM 探测器进一步增强了系统便携性^[64]。

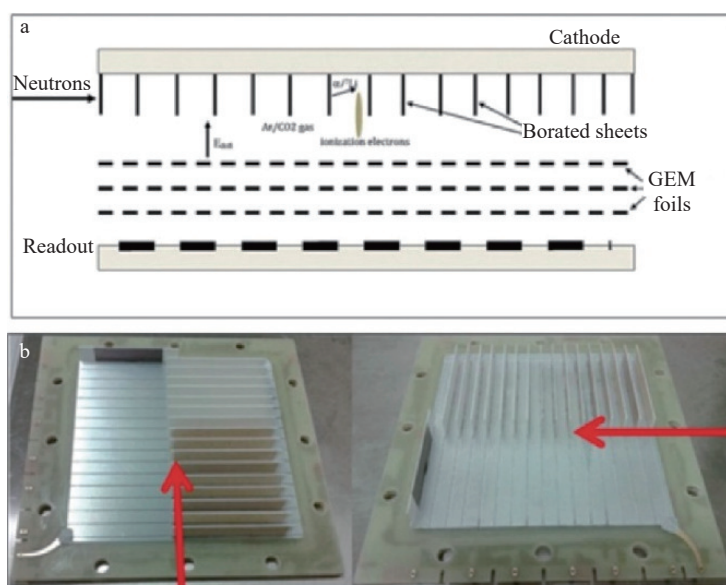


图5 S-GEM探测器结构示意图(a)和S-GEM探测器实物图(b)(箭头为中子束流方向)
 Fig.5 Schematic of the structure of the S-GEM detector (a) and Physical drawing of the S-GEM detector (b)
 (with the arrow showing the direction of the neutron beam flow)

4.3.2 基于 Micromegas 探测器的中子探测技术

中子探测通常需要结合中子转换层实现信号转换, Micromegas 探测器在此领域展现出独特优势。该技术的早期应用可追溯至 CERN 的 n_TOF 中子飞行时间系统, 其配置的 Micromegas 探测器系统用于确定其中子束流特性^[65], 美国橡树岭国家实验室也开展了同类探测器的研发工作^[66]。针对高 γ 背景下的中子能谱测量难题, Houry 等^[67] 提出了 DEMIN 方案, 该系统由 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的 Micromegas 探测器和 2 mm 厚的聚丙烯转换层组成, 实验表明其对中子的探测效率显著优于传统闪烁体探测器, 且具有优异的 γ 射线抗干扰能力。Qi 等^[68] 还将基于 Micromegas 的中子探测器用于测量 CSNS 的 back-n 中子束流轮廓。针对硼中子俘获治疗 (boron neutron capture therapy, BNCT) 的中子束参数测量需求, 中国科学技术大学 Fang 等^[69] 提出一种基于 Micromegas 技术的探测面积大且具有高计数能力的中子探测器, 该探测器可以实现 1.4 mm 的空间分辨能力。Jeanneau 研究组则创新性地 将 Micromegas 技术拓展至中子成像领域, 其研制的 1D 原型系统在多层线缆检测中实现了 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的空间分辨率^[70], 后续改进的 2D 成像系统进一步提升了检测效能^[71]。2009 年兰州大学团队提出了基于 Micromegas 的中子 CT 的方

案, 通过蒙特卡罗模拟验证了该技术在土壤植物根系动态监测中的可行性^[72]。Cools 研究组则探索了光学读出 Micromegas 技术在中子成像中的应用, 其研制的原型系统为中子成像提供了技术路径参考^[73]。

4.4 缪子成像领域

缪子成像是一种基于宇宙射线缪子对被检客体进行成像的技术^[74], 该技术在考古学、地质学、核材料监管及土木工程等领域展现出独特优势^[75]。过去二十余年里, 国内外多个实验室围绕该技术开展了系统性研究, 先后发展出基于漂移管^[76]、闪烁体探测器、微结构气体探测器^[77]、阻性板室^[78] 多种类型探测器的成像系统。值得关注的是, Micromegas 探测器在该领域的应用研究相对较少。Scanpyramids 项目作为 21 世纪初期该领域最具代表性的应用案例, 其研发的便携式检测系统采用四组电阻板 Micromegas 探测器阵列, 单组探测器有效面积达 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, 并配有 XY 条形读出结构^[77]。该系统成功实现了金字塔内部结构的无损探测, 验证了缪子成像技术在复杂环境下的适用性。在特殊材料检测方面, 缪子对高 Z 材料 (尤其是核材料) 的强敏感性使其在公共安全与核材料监管领域具有重要应用价值。中国科学技术大学 Liu 等^[79] 针对高 Z 材料检测需求, 构建

了基于 Micromegas 探测器的成像系统,通过实验验证了该技术的可行性,为后续开展核材料识别与定位研究奠定了基础。

5 结论

气体探测器作为最早问世的核辐射探测装置,凭借其耐辐射性强、结构设计灵活、使用寿命长、环境适应性优异以及性价比高显著优势,在经历百余年的技术演进后,依然在粒子物理实验、核工程及核技术应用等关键领域发挥着不可替代的作用。自 20 世纪 90 年代以来,气体探测器迎来新的发展高潮,期间所涌现出的多种新型探测器,对后续气体探测器的发展趋势与方向将会产生深远的影响。近二十年来,经过国内外多个研究机构的持续深入研究,MPGD 的发展十分迅速,且已取得丰硕的成果,如 THGEM、Micromegas 等。其不仅在粒子物理领域的应用十分活跃,还广泛应用于医学影像、公共安全、地质研究等领域。未来发展的可能方向有以下几方面:(1)研发具有更高的计数率、时空分辨能力和探测效率的气体探测器;(2)新技术的不断应用,如智能化和集成化;(3)探索新的探测材料(工作介质)、探测机制和加工工艺等。总之,气体探测器具有巨大的发展潜力与应用价值,未来仍将是核辐射探测器的研究热点之一。

参考文献:

- [1] Kraner H W. Radiation detection and measurement[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(4): 495.
- [2] Sauli F. Gaseous radiation detectors[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 周日峰. 高能 X 射线工业 CT 气固混合型电子倍增辐射探测器探索研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [4] Sauli F, Sharma A. Micropattern gaseous detectors[J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1999, 49(1): 341-388.
- [5] Rutherford E, Geigery H. An electrical method of counting the number of α -particles from radio-active substances[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1908, 81(546): 141-161.
- [6] Geiger H, Müller W. Elektronenzählrohr zur messung schwächster aktivitäten[J]. *Naturwissenschaften*, 1928, 16(31): 617-618.
- [7] Fukui S, Miyamoto S. A new type of particle detector: The «discharge chamber»[J]. *Il Nuovo Cimento*, 1959, 11(1): 113-115.
- [8] Chikovani G E, Roinishvili V N, Mikhailov V A. Operation mechanism of the track spark chamber[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1964, 29(2): 261-269.
- [9] Charpak G, Bouclier R, Bressani T, et al. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1968, 62(3): 262-268.
- [10] Charpak G, Sauli F. High-resolution electronic particle detectors[J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1984, 34: 285-350.
- [11] Sauli F. Applications of gaseous detectors in astrophysics, medicine and biology[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1992, 323(1-2): 1-11.
- [12] Sauli F. Radiation imaging with gaseous detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2018, 878: 1-9.
- [13] Sauli F. Micro-pattern gaseous detectors in high-energy and astroparticle physics[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(27): 2130016.
- [14] Oed A. Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1988, 263(2-3): 351-359.
- [15] Sauli F. GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1997, 386(2): 531-534.
- [16] Giomataris Y, Rebourgeard P, Robert J P, et al. MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1996, 376(1): 29-35.
- [17] Chechik R, Breskin A, Shalem C, et al. Thick GEM-like hole multipliers: Properties and possible applications[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, 535(1-2): 303-308.
- [18] Jeanneret P. Time projection chambers and detection of neutrinos[D]. Switzerland: University of Neuchatel, 2001.
- [19] Periale L, Peskov V, Carlson P, et al. Evaluation of various planar gaseous detectors with CsI photocathodes for the detection of primary scintillation light from noble gases[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, 497(1): 242-248.

- [20] 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [21] Sauli F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2016, 805: 2-24.
- [22] 魏阳东, 周健荣, 周晓娟, 等. 基于气体电子倍增器的位置灵敏快中子探测器优化设计[J]. *核技术*, 2021, 44(2): 45-50.
Wei Yangdong, Zhou Jianrong, Zhou Xiaojuan, et al. Optimal design of the position sensitive fast neutron detector based on GEM[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, 44(2): 45-50 (in Chinese).
- [23] Bellazzini R, Bozzo M, Brez A, et al. The WELL detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1999, 423(1): 125-134.
- [24] Shalem C, Chechik R, Breskin A, et al. Advances in thick GEM-like gaseous electron multipliers: Part I: Atmospheric pressure operation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 558(2): 475-489.
- [25] Bencivenni G, De Oliveira R, Morello G, et al. The micro-resistive WELL detector: a compact spark-protected single amplification-stage MPGD[J]. *Journal of Instrumentation*, 2015, 10(2): P02008.
- [26] Tian X, He S, Zhou Y, et al. The micro-resistive groove detector: a new compact single amplification-stage MPGD[J]. *Journal of Instrumentation*, 2024, 19(7): P07031.
- [27] Krieger C, Kaminski J, Lupberger M, et al. A GridPix-based X-ray detector for the CAST experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2017, 867: 101-107.
- [28] Attié D, Aune S, Berthoumieux E, et al. Current status and future developments of micromegas detectors for physics and applications[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(12): 5362.
- [29] He R, Niu X Y, Wang Y, et al. Advances in nuclear detection and readout techniques[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(12): 205.
- [30] 王宇. 基于 Micromegas 的高分辨缪子成像系统读出电子学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [31] Derré J, Giomataris I. Spatial resolution and rate capability of MICROMEGAS detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, 461(1-3): 74-76.
- [32] Peyaud B. KABES: a novel beam spectrometer for NA48[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, 535(1-2): 247-252.
- [33] Giomataris I, De Oliveira R, Andriamonje S, et al. Micromegas in a bulk[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 560(2): 405-408.
- [34] Chefdeville M, Colas P, Giomataris Y, et al. An electron-multiplying 'Micromegas' grid made in silicon wafer post-processing technology[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 556(2): 490-494.
- [35] Platchkov S, Abbon P, Ball J, et al. A large size MICROMEGAS detector for the COMPASS experiment at CERN[C]//2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Norfolk, VA, USA: IEEE, 2003: 292-296.
- [36] Bernet C, Abbon P, Ball J, et al. The $40 \times 40 \text{ cm}^2$ gaseous microstrip detector Micromegas for the high-luminosity COMPASS experiment at CERN[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2005, 536(1-2): 61-69.
- [37] Thibaud F, Abbon P, Andrieux V, et al. Performance of large pixelised Micromegas detectors in the COMPASS environment[J]. *Journal of Instrumentation*, 2014, 9(2): C02005.
- [38] Aad G, Abbott B, Abbott D, et al. Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(9): 09015.
- [39] Aad G, Abbott B, Abbott D, et al. Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(9): 09015.
- [40] 孙志朋. 高计数率的 TPC 探测器读出电路研究与设计[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2021.
- [41] 张俊伟. GEM-TPC 性能研究[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2017.
- [42] Kappler S, Bieser F, Kaminski J, et al. A GEM-TPC prototype with low-noise highly integrated front-end electronics for linear collider studies[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(3): 1039-1043.
- [43] Dehmelt K. A large prototype of a time projection chamber for a linear collider detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, 623(1): 97-99.
- [44] Ledermann B, Kaminski J, Kappler S, et al. Development studies for the ILC: Measurements and simulations for a time projection chamber with GEM technology[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, 581(1-2): 232-235.
- [45] 张余炼, 王海云, 祁辉荣, 等. GEM-Micromegas 探测器

- 初步实验研究[C]//第十八届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 成都: 中国电子学会, 中国核学会核电子学与核探测技术分会, 2016.
- [46] Adolffson J, Ahmed M, Aiola S, et al. The upgrade of the ALICE TPC with GEMs and continuous readout[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16(3): 03022.
- [47] 邱天力. CEE-TPC 原理样机的研制[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2023.
- [48] Bernard D. HARPO—a gaseous TPC for high angular resolution γ -ray astronomy and polarimetry from the MeV to the TeV[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2013, 718: 395-399.
- [49] Tomas A. Development of time projection chambers with micromegas for rare event searches[D]. Spain: University of Zaragoza, 2013.
- [50] Castel J, Cebrián S, Coarasa I, et al. Background assessment for the TREX dark matter experiment[J]. *The European Physical Journal C*, 2019, 79(9): 782.
- [51] Klein M, Schmidt C J. CASCADE, neutron detectors for highest count rates in combination with ASIC/FPGA based readout electronics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2011, 628(1): 9-18.
- [52] Schmidt C J, Klein M. Scientific reviews: The CASCADE neutron detector: a system for 2D position sensitive neutron detection at highest intensities[J]. *Neutron News*, 2006, 17(1): 12-15.
- [53] Uno S, Uchida T, Sekimoto M, et al. Two-dimensional neutron detector with GEM and its applications[J]. *Physics Procedia*, 2012, 26: 142-152.
- [54] Croci G, Claps G, Caniello R, et al. GEM-based thermal neutron beam monitors for spallation sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2013, 732: 217-220.
- [55] Claps G, Murtas F, Pietropaolo A, et al. ^3He -free triple GEM thermal neutron detector[J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2014, 105(2): 22002.
- [56] Muraro A, Croci G, Perelli Cippo E, et al. Performance of the high-efficiency thermal neutron BAND-GEM detector[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2018, 2018(2): 023H01.
- [57] Pfeiffer D, Brunbauer F, Cristiglio V, et al. Demonstration of Gd-GEM detector design for neutron macromolecular crystallography applications[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(4): P04023.
- [58] Pfeiffer D, Resnati F, Birch J, et al. First measurements with new high-resolution gadolinium-GEM neutron detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(5): P05011.
- [59] 周健荣. 二维位置灵敏 GEM 中子探测器研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [60] Yan J Q, Xie Y G, Hu T, et al. Simulation and performance study of ceramic THGEM[J]. *Chinese Physics C*, 2015, 39(6): 066001.
- [61] Zhou J, Zhou X, Zhou J, et al. A ceramic GEM-based neutron beam monitor for China spallation neutron source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2020, 962: 163593.
- [62] Zhou J, Xiu Q, Zhou X, et al. Highly efficient GEM-based neutron detector for China spallation neutron source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2020, 953: 163051.
- [63] Yang T, Zhou J, Zhou X, et al. A novel method to improve the spatial resolution of GEM neutron detectors with a stopping layer[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2022, 69(1): 68-77.
- [64] Zhou J, Zhou J, Zhou X, et al. A sealed ceramic GEM neutron detector with the mixture gas Ne/CO_2 [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2022, 1024: 166076.
- [65] Rubbia C, Tzima A, Kadi Y, et al. A high resolution spallation driven facility at the CERN-PS to measure neutron cross sections in the interval from 1 eV to 250 MeV : a relative performance assessment[C]. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [66] Britton C L, Bryan W L, Wintenberg A L, et al. A detector for neutron imaging[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(3): 1016-1019.
- [67] Houry M, Delagnes E, Riz D, et al. DEMIN: a neutron spectrometer, Micromegas-type, for inertial confinement fusion experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, 557(2): 648-656.
- [68] Qi B, Li Y, Zhu D, et al. Measurement of the neutron beam profile of the Back-n white neutron facility at CSNS with a Micromegas detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2020, 957: 163407.
- [69] Fang Z, Zhang Z, Shi B, et al. A large area, high counting rate micromegas-based neutron detector for BNCT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2023, 1053: 168361.
- [70] Andriamonje S, Delbart A, Espagnon I, et al. Comparison between image plate and Micromegas detector for thermal neutron tomography[C]//Advances in Neutron Scattering Instrumentation. Seattle, WA: SPIE, 2002:

- 214.
- [71] Andriamonje S, Dangendorf V, Espagnon I, et al. Neutron imaging with a micromegas detector[C]//IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004. Rome, Italy: IEEE, 2005: 1621-1625.
- [72] Zhou Jianrong, Zhang Yi, Wang Shanshan, et al. Study of neutron CT with micromegas as a neutron detector[J]. Nuclear Physics Review, 2009, 26(4): 322-326 (in Chinese).
- [73] Cools A, Aune S, Beau F, et al. Neutron and beta imaging with micromegas detectors with optical readout[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2023, 1048: 167910.
- [74] 赵言炜. 基于蒙特卡罗方法的缪子探测器成像系统及图像重建算法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [75] Bonechi L, D'Alessandro R, Giammanco A. Atmospheric muons as an imaging tool[J]. *Reviews in Physics*, 2020, 5: 100038.
- [76] Borozdin K N, Hogan G E, Morris C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons[J]. *Nature*, 2003, 422: 277.
- [77] Morishima K, Kuno M, Nishio A, et al. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons[J]. *Nature*, 2017, 552(7685): 386-390.
- [78] Le Menedeu E. RPC application in muography and specific developments[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(6): C06009.
- [79] Liu C M, Wen Q G, Zhang Z Y, et al. Study of muon tomographic imaging for high-Z material detection with a Micromegas-based tracking system[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(3): 263-268.