

氚测量技术进展

陈梦竹¹, 咸立伟², 周贝霖¹, 胡石林^{1*}

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要:根据测量原理不同将氚测量计量技术分为直接物理测量法和放射性测量法, 详细讨论了体积法、重量法、质谱法、气相色谱法、拉曼光谱法、量热法、电离室法、液体闪烁计数法、韧致辐射测量法以及氚成像技术等方法的原理、特点。最后, 基于现有技术, 提出氚测量技术应继续朝着多技术集成、在线实时监测和便携化方向发展。

关键词:氚; 测量; 计量; 量热; 质谱

中图分类号: TL84

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0044-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.009

Progress in tritium measurement technology

CHEN Meng-zhu¹, XIAN Li-wei², ZHOU Bei-lin¹, HU Shi-lin^{1*}

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Test Technologies, Beijing 100074, China)

Abstract: This paper reviews tritium measurement techniques, which can be divided into two main categories based on measurement principles: direct physical measurement and radioactive measurement. The principles and characteristics of methods such as volumetric method, gravimetric method, mass spectrometry, gas chromatography, Raman spectroscopy, calorimetry, ionization chamber method, liquid scintillation counting method, bremsstrahlung measurement, and tritium imaging techniques are discussed in detail. Finally, based on existing technologies, it is proposed that tritium measurement techniques should continue to develop toward the integration of multiple technologies, online real-time monitoring, and portability.

Key words: tritium; measurement; metrology; calorimetry; mass spectrometry

氚(³H 或 T)是氢的唯一放射性同位素, 半衰期为 12.32 a, 衰变时会释放出 β 射线。氚在自然界中含量很低, 但人类活动(如核反应堆运行、核燃料后处理、核试验等)会产生大量氚。氚会以多种形态存在, 包括气态、氟化水蒸气和有机结合氚, 可随水循环进入环境和生物链。

鉴于氚的价值, 对其进行测量计量的意义重大。在核能领域, 氚是核聚变反应堆(ITER)的关键燃料, 对其精确计量是燃料循环和库存管理的要求; 在医学和生物学领域, 氚标记化合物可用于药物代谢和分子示踪研究; 在环境科学中, 氚是评估核设施泄漏、研究水文循环的理想示踪剂^[1-3]。因此, 发展准确、灵敏、可靠的氚测量技术, 对保障核安全、服务科学研究具有重要的意义。

氚测量具有明显的复杂性。首先, 不同形态氚样品的探测机理存在差异; 其次, 氚测量覆盖的浓度范围极宽, 从环境本底到仓库存储, 对检测的灵敏度和量程要求差异显著; 最后, 不同应用场景对测量性能的侧重点不同, 如环境监测关注低检测限和准确性, 工艺过程强调在线实时监测, 物料衡算则强调无

损分析和绝对计量能力。因此, 单一的测量技术方法往往难以满足不同场景的综合需求。已有研究多集中于单项技术原理、装置开发和验证。基于此, 本文中从测量原理出发, 对氚的主要测量计量技术进行分类介绍, 围绕其基本原理、适用范围和发展趋势展开分析, 以期为氚测量计量、在线监测和环境分析提供参考。

氚的测量方法依据测量原理分为 2 类: 一类是直接物理测量法(体积法、重量法、质谱法、气相色谱法、拉曼光谱法、量热法), 通过测定压力、体积、质量或热功率等物理量来量化氚, 适用于高浓度氚样品; 另一类是放射性测量法(电离室法、液体闪烁计数法、韧致辐射测量法、氚成像), 通过探测氚衰变释放的 β 射线或引发的次级效应(如韧致辐射)来确定活度, 更适用于低浓度氚样品。

1 直接物理测量法

1.1 体积法和重量法

体积法适用于高浓度氚气的快速计量, 基于理想气体状态方程, 通过测定已知体积容器内样品气

收稿日期: 2026-04-03; 修回日期: 2026-06-17

作者简介: 陈梦竹(1998-), 女, 博士生, 研究方向为量热及仪器分析, 1336466264@qq.com; 胡石林(1965-), 男, 本科, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为材料生产, 通讯联系人, husi@ciae.ac.cn。

体的压力和温度,结合氡组分浓度计算氡的物质的量。对于混合气体,若已知氡组分摩尔分数 x_T ,则氡分压为 $P_T = x_T P$,氡的物质的量可由式(1)计算:

$$\eta_T = P_T V / RT \quad (1)$$

式中, η_T 为氡的物质的量, mol; P_T 为氡分压, Pa; V 为容器体积, m^3 ; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度, K。

体积法适用于高浓度含氡气体的快速估算,但精度受温度、压力的影响较大。

重量法则通过高精度称量装置测定储氡容器在储氡前后的质量差,从而得到氡质量。该方法可用于计量纯氡气体或浓度比例已知的氢-氡混合气,结果直观,操作容易,但对环境稳定性、称量系统灵敏度以及振动控制要求较高。

体积法和重量法都适合高浓度氡气的计量和快速估算,操作方法简单,但都无法确定样品气体中的氡分压或浓度,需使用质谱、拉曼光谱、气相色谱等确定气体化学组成,也不能用于痕量分析、复杂混合体系及在线实时检测。

1.2 质谱法

质谱法(MS)是分析氢同位素的经典方法之一,基本原理是将氡气样品电离后,在电磁场中按照不同质荷比(m/z)分离,通过检测离子流强度确定同位素丰度。对于含氡样品,气体通常可直接进样分析,液体需先转化为气态,固体则需经热解、还原或制靶等前处理后再分析。质谱法用于含氡气体分析需要特别注意: β 电子可能吸附在仪器组件增加噪声水平;记忆效应会影响连续测量;为区分质量数接近的 HT、D₂ 和 ⁴He 等组分,仪器需具备较高分辨率(>1 000)。质谱分析的原理示意图如图 1 所示。



图 1 质谱分析氢同位素的原理示意图

普通的 MS 适用于稳定同位素及高浓度放射性同位素(氡浓度需 $>10^6$ TU)的日常分析,无法对低水平氡进行有效分析。将其与加速器连用,加速器质谱法(AMS)可通过直接计数原子显著提高灵敏度,在超低水平氡测量(mg 级甚至 μg 级)中表现突出。Muller^[4]利用 AMS 实现了雨水中氡的定量测量,测得 T/D 丰度比达到 10^{-14} 量级;King 等^[5]利用

AMS 测量气体样品中的氡,仅需 32 mBq 样品即可获得 2.2×10^{-13} 量级的 T/H 丰度比。由于 AMS 不依赖衰变统计,而是直接进行原子计数,因此在痕量氡分析中具有检测限低、测量时间短和同位素分辨能力强等优势。

总体上,质谱法,特别是 AMS,适合用于痕量氡测量,对样品需求小、灵敏度高、检测限低、同位素分辨能力强、测量速度快、准确度和精度高,在氡测量计量体系中占据关键地位,但设备成本高、运行维护复杂,且通常属于有损检测。

1.3 气相色谱法

气相色谱法(GC)主要用于分离和定量分析氢同位素气体以及含氡杂质气体(如 CH_3T 、 CT_4) ,分离原理是基于不同气体在色谱柱固定相和流动相间的分配系数差异^[6]。由于氢同位素的分子间作用力较弱,为了实现高效分离,通常需在低温下运行(液氮温度 77 K)^[7]。色谱柱填料通常为活性氧化铝、分子筛等,部分研究通过掺杂 Fe、Mn 等过渡金属进一步提高氢同位素分离效果,当色谱柱被杂质污染而失去分离功能时,需在惰气气氛下加热去除杂质^[8-9]。在德国卡尔斯鲁厄氡实验室(TLK),GC 已被用于分析聚变工艺中出现的含氡气体,检测限可达亚 10^{-6} 级。GC 在含氡气体的分离中表现突出,既能够分离氢的所有同位素分子,又能够进行杂质分析(N_2 、 O_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 、HTO 等),全面表征气体组成,兼备定性定量功能^[10]。气相色谱分离原理示意图如图 2 所示。

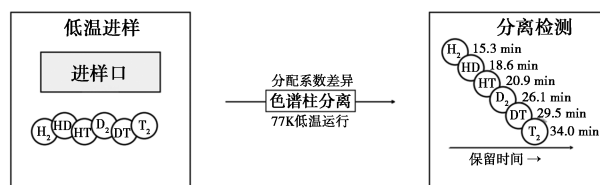


图 2 气相色谱分离氢同位素的原理示意图

GC 在工艺气组分分析中,分离能力强、技术成熟、稳定性好、可同时分析主要组分和痕量杂质、设备与运行成本相对较低,但通常需要低温运行,分析周期较长,且存在色谱柱污染、样品消耗和氡记忆效应等问题。GC 是聚变堆燃料循环、氡处理系统的在线监测以及含氡气体混合物的常规分析领域中的一种核心技术。

1.4 拉曼光谱法

激光拉曼光谱法的原理是单色光与分子相互作用后发生非弹性散射,通过分析入射光频率不同

的散射光谱得到分子振动、转动信息,从而识别氢同位素分子(如 T_2 、DT、HT)确定浓度。拉曼光谱法适合用于强放射性、高压或高温等复杂工况下的在线监测^[11]。

由于拉曼散射信号微弱,通常需要在系统光路、探测器和光谱采集上进行强化。TLK 曾将激光拉曼光谱安置在手套箱内,并采用共振腔技术,将散射信号增强约 50 倍,有利于信号捕捉分析^[12],并用于在线分析流动气样中的 T_2 、DT、HT 及氟化甲烷等^[13]。

拉曼光谱法能够快速识别氢同位素分子,适用于聚变堆燃料循环过程监控、氟处理工艺在线分析,且具有无接触、无损和无需样品前处理等优点,但对低浓度氟的检测灵敏度比较有限,且测量结果易受激光波动、光学校准精度和环境背景光干扰。

1.5 量热法

量热法通过测量氟衰变释放的热功率实现对氟量的绝对计量。氟的衰变热功率约为 0.324 W/g,测量样品吸收的衰变热可直接换算为氟含量。量热法适用于气体、液体、固体及其混合样品,尤其适合固态氟化物(如储氟金属)的高精度无损计量,是氟物料衡算的关键方法,量热仪器则是氟入库前进行衡算的标准设备^[14]。氟量热仪已广泛应用于全世界的氟实验室及工厂中。人们相继开发了不同类型的量热计,并且向着高精度标定、低检测线、微量热等方向持续发展。

TLK 在氟量热计领域开展了几十年的系统性应用与研究;Dörr 等^[15]报道了一种采用惯性制导温控技术的高分辨真空量热计,检测限达 1 μ W; Alecu 等^[16]验证了 TLK 4 台量热计的测量准确度,氟量超过 0.5 mg 时相对不确定度仅 0.3%,且设备计量结果最大偏差不超过 0.6%;Bükki-Deme 等^[17]通过对量热设备进行软硬件升级,采用 LabView 程序与闭环 Ziegler-Nichols 控制,在 0.5 μ W ~ 1 W 全量程范围内实现了更高效、智能的校准测量,进一步降低了检测限并提高了智能化测量水平。

中国在氟的量热方面也颇具贡献。王国庆等^[18]研制的自动化量热测氟装置采用了双杯对接技术和标准加热电阻预热技术,在 300 ~ 3 000 mW 功率范围内测量不确定度达 0.4%,实现了含氟部件氟含量的快速高精度测量。刘丽飞等^[19]研制的热流型量热计(基于热电堆分区结构与双杯对称设计),采用稳态测量模式,热平衡时间 8 ~ 10 h,并可通过智能 PID 控制优化稳定度。

量热法作为一种适用不同样品形态、不依赖放

射性标准源的精确计量氟的无损检测方法,热平衡时间较长,对环境温度稳定性要求高,不适合极低活度或痕量的氟分析(检测下限一般为 μ g),适用于 mg ~ g 量级氟的精准核材料衡算、聚变堆氟燃料循环及放射性废物管理等场景,而在快速响应或痕量分析需求下,则需结合 PVT、AMS 等方法。

2 放射性测量法

2.1 电离室法

电离室法(IC)的原理基于氟衰变释放的 β 射线使工作气体(或与载气)电离,生成电子-离子对,在电场作用下产生与氟活度呈正比的电离电流,通过测量电流强度即可计算得到氟的浓度。由于 β 射线的平均能量较低,射程短,因此通常采用结构如图 3 所示的流气式电离室,使待测气体直接流经电离室灵敏体积,以提高探测效率^[20]。

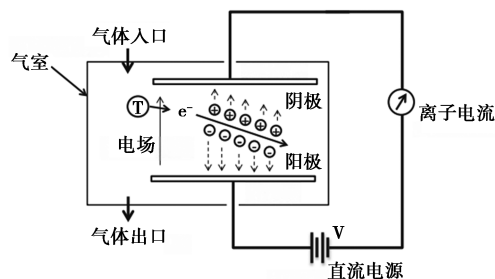


图3 气态T的电离室操作示意图

电离室结构简单、响应快、测量范围宽、稳定性好、可实现在线连续监测。如孟丹等^[21]研制的离线产氟实验用氟在线监测系统,采用体积为 50 mL 的流气式电离室,在氟气气氛下约 35 V 即可进入饱和区,探测下限可达 3.7×10^7 Bq/m³,能够满足离线产氟回路中氟在线监测的要求。

电离室测氟的探测限相对较高,结果易受气体种类和压力^[22]、湿度、气溶胶、绝缘漏电、 γ 本底及氦气干扰等多因素影响测量精度^[20]。电离室主要反映活度信息,不能提供氢同位素组成和化学形态,需与 GC 或拉曼光谱联用。

2.2 液体闪烁计数法

液体闪烁计数法(LSC)的原理是将含氟样品与闪烁液混合,氟衰变的 β 粒子激发溶剂分子,将能量传递给溶质,使溶质发出荧光。荧光信号被光电倍增管(PMT)探测并转换为电脉冲,通过分析脉冲幅度谱来确定氟的活度。液体闪烁分析仪结构如图 4 所示。

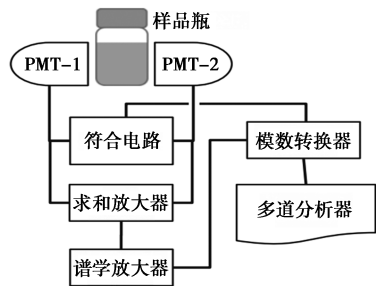


图 4 现代液体闪烁分析仪示意图

LSC 在测量低能 β 射线方面具有较高的探测效率和较低本底水平,因此特别适用于核设施周围水体和环境监测,生物样品、含氡废水中的氡含量分析及地下水示踪。Reynolds 等^[23]对液体闪烁计数器的早期发展做出了奠基性贡献,Benson^[24]又具体描述了利用 LSC 测量水中氡的方法,进一步推动了其在氡测量中的应用。近年来,人们通过不断地优化样品制备、选择不同闪烁体系和质量控制流程,不断提升 LSC 的测量精度。

LSC 可实现低水平氡的高灵敏度测量,检测限低、技术成熟、结果可靠。但其局限性在于样品需与闪烁液混合,属于破坏性测量,前处理过程烦琐同时产生有机放射性废液,增加废物处理负担。

2.3 韧致辐射测量法

韧致辐射测量法,又称 β 射线诱导 X 射线光谱法(BIXS)。该方法是通过 NaI 或高纯锗探测器探测氡 β 粒子在特定材料介质中减速时产生的连续 X 射线(即韧致辐射)进行测量^[25]。

相较于 β 粒子本身,韧致辐射具有更强的穿透能力,因此可用于密封容器内氡气体的无损测量以及某些材料中氡分布的深度探测,探测机理见图 5。

为了增强韧致辐射的强度,通常会选择原子序数大的材料作为吸收剂。Matsuyama 等^[26]通过采用镀金铍窗成功提高了 BIXS 测量气体氡的探测效率。郭一帆等^[27]建立了韧致辐射计数率与氡分压的标定关系,实现了对含氡气体中氡分压的实时在线测量,且响应速度快、稳定性较好。

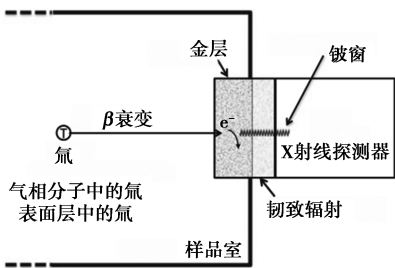


图 5 BIXS 测量气相中 T 的机理

BIXS 的优点在于无损检测、无需预处理、可实现在线监测,但探测效率受 β 粒子与材料相互作用效率限制,对低活度样品的灵敏度有限,且测量结果依赖于几何结构和材料种类,需要针对不同场景建立校准曲线。BIXS 可用于聚变堆氡燃料循环系统、氡工艺气在线监测、氡光源剂量评估及材料中氡深度分析等领域。

2.4 氡成像技术

氡成像板技术(TIPT)通过放射自显影可以清晰展现材料表面氡的分布情况。该技术的核心部件是覆有光刺激荧光粉(PSP)的成像板(IP)。含氡样品的表面与成像板接触后,氡 β 粒子在荧光层中沉积能量形成潜影,随后通过激光扫描读出光激发光(PSL)的信号,实现氡分布成像,光的强度与对应位置的氡活度呈正比。毛莉等^[28]利用成像板技术研究了不同氡钛原子比(T/Ti)的含氡钛膜,发现处于单相区的钛膜表面氡分布均匀,而处于双相区的样品则呈现明显的不均匀性。

TIPT 具有高空间分辨率、可视化直观和可定量分析的优点,适合研究氡在材料表面的分布,但通常难以直接反映体相总量,且测量结果受样品表面状态、接触几何条件和曝光时间等因素影响。

3 氡测量计量技术体系及新兴测量技术

目前,氡测量计量技术体系已较为成熟,不同方法在测量对象、应用场景及性能指标等方面各具特点,具体可见表 1 所示。

表 1 氡的主要测量技术

测量方法	基本原理	主要适用范围	特点与局限
体积法、重量法	分别为气体状态方程、精密称重	高浓度含氡气浓度粗略估计	操作简单;设备要求较高
加速器质谱法(AMS)	质荷比分离	氢同位素丰度分析、痕量氡	高分辨率、高精度;记忆效应,有损检测,操作复杂,设备昂贵
气相色谱法(GC)	分配系数差异	氢同位素及含氡杂质气体分离	可分析多组分气体;需低温操作,柱需再生
拉曼光谱法	分子振动-转动光谱	在线气体组分分析	非接触、无破坏、在线;信号微弱,系统复杂

续表

测量方法	基本原理	主要适用范围	特点与局限
量热法	衰变热测量	固态、液态、气态氚绝对测量	非破坏、基准方法、不受形态干扰;响应慢(需热平衡),仅适用于高活度样品
电离室法(IC)	β 射线引发电离电流	高浓度气态氚在线监测	结构简单、响应快、量程宽;探测限较高,有记忆效应
液体闪烁计数法(LSC)	β 粒子激发闪烁发光	环境水样、生物样品	灵敏度极高、应用广泛;破坏性、有废液、耗时长
韧致辐射测量法(BIXS)	次级 X 射线探测	密封容器内氚、材料深层氚分布	非破坏、有穿透力;探测效率相对较低
氚成像技术(TIPT)	辐射自显影	材料表面氚分布情况	高空间分辨率、可定量;仅限表面分析

除上述氚测量计量技术体系的方法外,为满足氚在更多场景下的测量需求,还出现了一些新兴检测技术。例如,Kang 等^[29]提出了基于质子交换膜电解富集的实时检测方法,可将水中 HTO 电解转化为气态 HT,并结合塑料闪烁体实现实时探测,探测效率堪比 LSC,预处理时间极短,为开发轻便型的水下氚监测装置提供了思路。Li 等^[30]构建了基于无机闪烁体的连续测量方法,利用 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 闪烁颗粒与波长位移光纤构建流通池,含氚水流过时 β 粒子激发闪烁体发光,光纤收集光信号,60 min 测量时间内检测下限达 600 Bq/L,计数率与氚活度呈良好线性关系,性能优于单纯闪烁颗粒。这些方法在提升氚的原位监测能力和拓展现场应用方面具有出色的应用潜力。

4 结语

依据功能取向,可将氚测量技术划分为高浓度定量计量、低水平活度分析、组分分析、在线监测及空间分布表征 5 类。各类方法在特定应用场景(聚变堆燃料循环及氚工艺系统)中均表现出良好的适用性,通常需要同时实现组分分析、活度监测与库存核算等多种功能,仅依赖单一测量手段难以满足工程需求。已有研究表明,采用多技术协同是更为合理的技术路线,如 GC 与拉曼光谱用于过程气体组分分析,电离室及韧致辐射技术用于实时在线监测,量热法用于库存核算,而 LSC 与 AMS 适用于环境样品及痕量分析。由此可见,构建多技术集成的氚检测体系是实现工程化与系统化应用的关键方向。

未来,氚测量计量技术可向着以下几个方向继续发展。首先,多技术组合利用能够扩大测量计量范围,实现更高精度与更全面的测量结果;其次,发展实时化与原位化测量,以满足对氚动态监测的需求;此外,发展微型化与智能化数据处理技术,能够提高复杂背景条件下的信号识别、校准修正;最后,

在极低浓度氚检测方面,仍需探索高效储氚材料与新型探测机理,以持续降低探测限。

参考文献

- [1] Filer C N. Synthesis and characterization of tritium-labelled substances[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, 137: 261–272.
- [2] 张贞. 大亚湾核电基地周围海水氚活度浓度的监测概况[J]. *核安全*, 2022, 21(6): 19–24.
- [3] 李文红, 谢锋, 杨宝路, 等. 氚的来源与监测[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2023, 47(10): 642–646.
- [4] Muller R A. Radioisotope dating with a cyclotron: The sensitivity of radioisotope dating is improved by counting atoms rather than decays[J]. *Science*, 1977, 196(4289): 489–494.
- [5] King S E, Phillips G W, August R A, et al. Detection of tritium using accelerator mass spectrometry[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1987, 29(1/2): 14–17.
- [6] Genty C, Schott R. Quantitative analysis for the isotopes of hydrogen— H_2 , HD, HT, D_2 , DT and T_2 —by gas chromatography[J]. *Analytical Chemistry*, 1970, 42(1): 7–11.
- [7] 刘振兴, 杨洪广, 赵巍巍, 等. 微气相色谱法分析氢氚同位素组分气体[J]. *分析测试学报*, 2022, 41(2): 266–270.
- [8] Saeki M, Hirabayashi T, Aratono Y, et al. Preparation of gas chromatographic column for separation of hydrogen isotopes and its application to analysis of commercially available tritium gas[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1983, 20: 762–768.
- [9] Vogt R, Ringel H, Hackfort H, et al. Gas chromatographic separation of hydrogen isotopes on molecular sieves[J]. *Fusion Technology*, 1988, 14: 574–578.
- [10] Tosti S. Gas chromatography and thermal cycling absorption techniques for hydrogen isotopes separation in water detritiation systems[J]. *Hydrogen*, 2023, 4(3): 694–708.
- [11] Schlosser M, Rupp S, Seitz H, et al. Accurate calibration of the laser raman system for the Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2013, 1044: 61–66.
- [12] Lasser R, Caldwell-Nichol S C, Dorr L, et al. Analytic of tritium-containing gaseous species at the Tritium Laboratory Karlsruhe[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 58: 411–415.

- [13] Fischer S, Sturm M, Schlosser M, *et al.* Laser raman spectroscopy for Katrin[J]. Nuclear Physics B, 2012, 229/230/231/232:492.
- [14] Hans K, Reinhard K, Rolf H. Tritium inventory measurements using calorimetry[J]. Fusion technology, 1992, 21(2P2):412-418.
- [15] Dörr L, Besserer U, Grunhagen S, *et al.* High resolution vacuum calorimeter[J]. Fusion Science and Technology, 2005, 48(1):358-361.
- [16] Alecu C G, Besserer U, Bornschein B, *et al.* Reachable accuracy and precision for tritium measurements by calorimetry at TLK[J]. Fusion Science and Technology, 2011, 60(3):937-940.
- [17] Bükki-Deme A, Alecu C G, Kloppe B, *et al.* Current status of tritium calorimetry at TLK[J]. Fusion Science and Technology, 2015, 67(2):282-285.
- [18] 王国庆, 柴爱民, 王世克, 等. 自动化量热测氚装置研制[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(9):1141-1146.
- [19] 刘丽飞, 武超, 胡石林, 等. 放射性核素量热计研制[J]. 核技术, 2022, 45(2):47-54.
- [20] Raja V, Babu D A R, Sharma D N. Low level current measurements for tritium monitor[C]. Proceedings of the symposium on advanced measurement techniques and instrumentation. Mumbai: Bhabha Atomic Research Centre, 2011:42.
- [21] 孟丹, 陈志林, 常瑞敏, 等. 离线产氚实验中氚在线监测系统的研制[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(3):528-531.
- [22] Ebenhöch S, Niemes S, Priester F, *et al.* Investigations of the applicability of a new accountancy tool in a closed tritium loop[J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 109:1376-1379.
- [23] Reynolds G T, Harrison F B, Salvini G. Liquid scintillation counters[J]. Physical Review, 1950, 78(4):488.
- [24] Benson R H. Limitations of tritium measurements by liquid scintillation counting of emulsions[J]. Analytical Chemistry, 1966, 38(10):1353-1356.
- [25] 杨海兰, 戴军, 侯雪莉. 氚自发光标志牌韧致辐射特性的实验测定[J]. 辐射防护, 2015, 35(6):381-384.
- [26] Matsuyama M, Torikai Y, Hara M, *et al.* New technique for non-destructive measurements of tritium in future fusion reactors[J]. Nuclear Fusion, 2007, 47(7):S464.
- [27] 郭一帆, 刘志珍, 吉晓梅, 等. 含氚气体中氚分压 BIX 在线测量方法研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(2):363-368.
- [28] 毛莉, 安竹, 邬琦琦, 等. 成像板对含氚钛膜的氚分析研究[C]. 全国核技术与应用学术研讨会, 2012.
- [29] Kang K, Bae J W, Kim H R. Detection of tritium generated by proton exchange membrane electrolysis by optimization of electrolysis conditions[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, 322(3):1417-1421.
- [30] Li Q, Chu S N, Wang C L, *et al.* Development of continuous measurement method for tritium in water based on $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ particles and wavelength shift fibers[J]. Journal of Instrumentation, 2025, 20(3):P03022. ■

(上接第 43 页)

- [17] Yang Y, Song L, Nagy Z K. Automated direct nucleation control in continuous Mixed Suspension Mixed Product Removal cooling crystallization[J]. Crystal Growth & Design, 2015, 15(12):5839-5848.
- [18] Yang Y, Nagy Z K. Combined Cooling and antisolvent crystallization in continuous Mixed Suspension, Mixed Product Removal cascade crystallizers; Steady-state and startup optimization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(21):5673-5682.
- [19] Yang Y, Nagy Z K. Advanced control approaches for combined cooling/antisolvent crystallization in continuous mixed suspension mixed product removal cascade crystallizers[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 127:362-373.
- [20] Alvarez A J, Myerson A S. Continuous plug flow crystallization of pharmaceutical compounds[J]. Crystal Growth & Design, 2010, 10(5):2219-2228.
- [21] Zhao M, Liu T, Song B, *et al.* Kinetic modelling and steady-state optimization of cooling crystallization by continuous oscillatory baffled crystallizer[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 519:164978.
- [22] Neugebauer P, Khinast J G. Continuous crystallization of proteins in a tubular Plug-Flow crystallizer[J]. Crystal Growth & Design, 2015, 15(3):1089-1095.
- [23] Mozdierz N J, Lee Y, Hong M S, *et al.* Mathematical modeling and experimental validation of continuous slug-flow tubular crystallization with ultrasonication-induced nucleation and spatially varying temperature[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 169:275-287.
- [24] Liao H, Huang W, Zhou L, *et al.* Ultrasound-assisted continuous crystallization of metastable polymorphic pharmaceutical in a slug-flow tubular crystallizer[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 100:106627.
- [25] Darmali C, Mansouri S, Yazdanpanah N, *et al.* Mechanisms and control of impurities in continuous crystallization; A review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(4):1463-1479.
- [26] Zhang B, Stefanidis G D, Van Gerven T. Can Ultrasound replace seeding in flow reactive crystallization of an aromatic amine? [J]. Organic Process Research & Development, 2024, 28(12):4431-4443.
- [27] Zhang C, Huang W, Li C, *et al.* Numerically investigating the effects of geometry on hydrodynamics and particle suspension performance in continuous oscillatory baffled crystallizers[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 249:117352.
- [28] Aprile G, Devos C, Vetter T, *et al.* Reflecting on barriers to continuous pharmaceutical crystallization[J]. Nature Chemical Engineering, 2025, 2(9):520-523. ■