

量热技术在氚计量中的发展与应用

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核技术综合研究所, 北京

²北京航天试验技术研究所, 北京

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月6日

摘要

氚作为一种放射性核素, 其准确计量是保障核材料衡算的基础。本文系统综述了量热技术在氚计量中的发展历程、基本原理、仪器类型及工程应用进展。首先回顾了量热法从早期氚半衰期测定到衡算的演变; 其次详细阐述了热功率平衡型、等温型和绝热型三类量热仪器的工作原理与技术特性并重点介绍了国内外一些典型的氚的量热仪器, 阐明了量热法在核材料保障监督、聚变燃料循环及放射性废物表征中具有不可替代的作用。最后, 从降低探测下限、加强智能化控制、缩短测量周期、模块化设计、增强极端环境适应性及原位监测研究六个方面展望了量热技术在氚计量中的未来发展方向。

关键词

量热, 量热仪器, 计量, 氚, 无损检测

Development and Application of Calorimetry in Tritium Measurement

Mengzhu Chen¹, Liwei Xian², Beilin Zhou¹, Shilin Hu^{1*}

¹Institute of Nuclear Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing

²Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing

Received: June 6, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 6, 2026

Abstract

Tritium, as a radioactive nuclide, requires accurate measurement as the foundation for nuclear material accountancy. This review systematically summarizes the development history, fundamental principles, instrument types, and engineering application progress of calorimetry in tritium measurement. First, the evolution of calorimetry from early tritium half-life determination to accountancy

*通讯作者。

文章引用: 陈梦竹, 咸立伟, 周贝霖, 胡石林. 量热技术在氚计量中的发展与应用[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(3): 240-249. DOI: 10.12677/amc.2026.143025

is reviewed. Second, the working principles and technical characteristics of three types of calorimeters—heat-balance, isothermal, and adiabatic—are elaborated in detail, and typical tritium calorimeters developed worldwide are highlighted, demonstrating the irreplaceable role of calorimetry in nuclear material safeguards, fusion fuel cycles, and radioactive waste characterization. Finally, future directions for calorimetry in tritium measurement are discussed from six aspects: lowering the detection limit, enhancing intelligent control, shortening the measurement time, modular design, improving extreme environmental adaptability, and *in-situ* monitoring research.

Keywords

Calorimetry, Calorimetric Instruments, Measurement, Tritium, Nondestructive Testing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氚(Tritium, ^3H)是氢的唯一放射性同位素,在核科学领域及工业中具有重要的战略地位。在能源领域,氚氘聚变[1]被认为是未来的清洁能源[2];在生物医学领域,氚标记化合物能够用于药物代谢与分子示踪研究[3]。准确、可靠的氚计量技术对于核能利用、核安全保障的发展具有重要意义。

目前高纯氚的计量方法包括压力-体积-温度(PVT)法、质量法和量热法。PVT法通过测量封闭容器内气体的压力、体积和温度来计算氚的量,仅适用于气态样品,但需要精确标定容器容积和温度。质量法通过精密称直接称量并结合氚的浓度计算氚含量,操作简单,但难以区分氢的其他同位素或杂质。而量热法基于热力学第一定律,通过测量氚 β 衰变释放的衰变热实现定量分析,是一种绝对计量[4]的无损检测技术,且该方法无需破坏样品封装、无需放射性标准源校准、不受样品形态和基质的干扰,因而在核材料保障监督、聚变燃料循环及放射性废物表征中具有不可替代性。在实际生产中,这三种方法互为补充:用PVT法和质量法进行估算,用量热法定期高精度核查,美国材料与试验协会(American Society of Testing Materials, ASTM)将量热法认定为无损计量氚的最准确的方法[5]。表1为氚的主要计量方法。

Table 1. Main measurement methods of tritium

表 1. 氚的主要计量方法

计量方法	基本原理	主要适用范围	特点与局限
PVT法	气体状态方程	高浓度含氚气的粗略估计	操作简单;设备要求较高
质量法	精密称重		
量热法	衰变热测量	固态、液态、气态氚绝对测量	非破坏无损检测、基准方法、不受形态干扰;响应慢,更适用高活度样品

本文对量热技术用于计量氚的历史[5]-[7]和量热原理[8][9]做了简要介绍,并对现有的氚的量热仪器[4][10]-[24]及影响计量结果的因素[18][25]-[27]进行了阐述,系统梳理了各类量热计的工作原理、性能指标及工程应用进展。最后,结合核材料生产、保障与监督的需求,对量热技术在氚计量中的未来发展方向进行了展望,以期为后续的研究和应用提供一定参考。

2. 量热法在氚计量中的发展与理论基础

2.1. 量热的历史背景

量热以温度的测量和量化为基础。在氚计量的领域,经历了从早期测定半衰期等物理参数到核材料质量衡算的转变。

20世纪50年代,研究人员开始将量热技术应用于氚半衰期的测量,主要集中于利用量热计测定氚衰变释放的热功率,结合已知的衰变能数据反推半衰期[6]。这一时期的量热装置较为简单,测量精度有限。随着温度传感器和电子测量技术的进步,量热法逐步确立了作为氚绝对测量的核心技术。

90年代初,随着核材料保障的需要,量热技术被用于核材料衡算[7]。英国 ANTECH 公司率先开发了面向核工业应用的商用氚量热计,德国卡尔斯鲁厄核研究中心(Tritium Laboratory Karlsruhe, TLK)开始研制高精度真空量热计,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)则专注于钚和氚量热技术的标准化。与此同时,中国核相关的科研院及法国原子能委员会(Atomic Energy Commission, CEA)等机构也相继开展了氚的量热仪器的研制。这些工作共同推动了量热技术计量氚从实验室研究走向工程化和系统化应用。

21世纪以来,国际公认了量热法在氚计量领域的核心地位。ASTM 发布的 C1458 标准,认定量热法为计量氚最准确的无损检测方法,并建立了不同的溯源体系。该标准包含测量不确定度评估方法以及数据处理流程等,为全球核材料衡算提供了统一的技术依据[5]。

2.2. 量热计量氚的原理

量热法基于热力学第一定律,即能量守恒定律。由于氚的半衰期相对较短,比活度高,产生热量的速率高,因此能够利用量热进行精确计量。氚发生 β 衰变时, β 粒子的平均能量仅为 5.7 keV,在空气中的射程约 6 mm,在固体材料中的射程则更短(约 0.5 μm),释放出的能量几乎全部沉积在样品容器内部[8]。量热仪器利用高精度温度传感器捕捉衰变热,将其转换为电信号,通过测量热功率计算得到氚量[9]。氚衰变产生的热功率(W_t , 单位 W)与氚质量(m , 单位 g)之间的关系可由式(1)表示:

$$W_t = 6.6876 \times 10^4 Q m T_{1/2}^{-1} A^{-1} \quad (1)$$

式中: Q 为 β 粒子平均衰变能(eV); A 为氚的相对原子质量; T 为氚的半衰期,将 $Q = 5.685$ keV、 $A = 3.017$ 、 $T = 3.888 \times 10^8$ s,代入式(1)得简化式(2):

$$W_t = 0.324m \quad (2)$$

由此可知,1 g 氚的衰变热功率约为 324 mW。因此,通过精确测量热功率,即可反推氚的质量或活度。这一线性关系是量热法定量分析的基础,也决定了量热计的检测限和测量范围。

值得注意的是,式(1)中的系数依赖于氚半衰期和平均衰变能的国际推荐值。随着测量精度的提高,这些基础常数也在不断更新。目前国际上公认的氚半衰期为 12.32 年(即 3.888×10^8 s),平均衰变能为 5.685 keV。量热计测得的热功率与氚质量之间的换算需采用统一的标准值,以确保不同实验室之间结果的可比性。

3. 氚量热计的主要类型

根据实验条件和测量方式,氚的量热计可分为三种主要类型[10]:热功率平衡型、等温型和绝热型。

热功率平衡量热计通过维持样品和环境的热平衡来计量样品。等温型量热计在恒温下操作,使用精密的温度控制系统来维持内部的温度不变,可以精确地测量样品的热量变化。绝热型量热计在绝热条件下工作,量热计内样品产生的热量被完全吸收并测量。

3.1. 热功率平衡型量热计

热功率平衡量热计通过维持样品和环境之间的热平衡来测量样品产生的热功率。其核心结构包括一个样品室、一个恒温外壳以及连接两者之间的热阻元件(如热电堆或金属热桥)。当样品释放热量时,热流通过热阻元件传递至恒温环境,建立稳定的温度梯度,由傅里叶热传导定律可知热流速率与温度梯度成正比,通过测量热阻元件两端温差即可确定样品热功率[11]。

在早期氚半衰期测定工作中的简单绝热/热平衡混合型量热计可视为该类仪器的雏形。这类量热计结构简单、响应较快,无需复杂的主动温控系统,制造成本较低。然而,由于依赖热阻元件的定标系数,其测量精度相对较低(通常为5%~10%),且易受环境温度波动的影响。因此,热功率平衡型量热计适用于较高功率样品(>100 mW)的快速筛查[12]。这类量热计较少用于高精度核材料衡算,多用于初步的活度评估。

热功率平衡型氚量热计的设计被集成到某些大体积量热计的快速预检模块中。例如,法国塞塔拉姆(SETARAM)开发了大体积量热计(LVC系列)[13],采用热功率平衡原理设计了一个快速筛查单元,用于对核废料桶进行初步热功率分级,以决定需要使用哪一种精度的等温型量热仪进行正式计量。

3.2. 等温型量热计

等温型量热计是目前氚测量中应用最广泛的类型。其核心原理是在恒温条件下操作,使用精密温度控制系统维持量热计内部温度恒定。其样品产生的热量通过帕尔贴元件(热电制冷器)或热电堆主动导出,通过测量维持恒温所需的电补偿功率或热流信号来计算样品热功率[14]。

等热量热计大多采用双杯结构,如图1所示[7]:样品室和参比室相互独立,外层为恒温罩。恒温罩通过水浴或真空保持温度稳定(典型精度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 或者 $\pm 0.001^\circ\text{C}$)。样品室和参比室外分别布置有多对热电偶串联而成的热电堆,用于检测双室之间微小的温差信号。样品室放置含氚样品,参比室放置非放射性等效样品(如贫铀或惰性材料)。通过测量两杯之间的温差信号,可以消除环境温度漂移和仪器本底噪声的共模分量,显著提高信噪比。当样品释放热量时,热电堆输出与热流成正比的电压信号。在稳定以后,此时双杯之间的差值电功率等于样品热功率[4]。

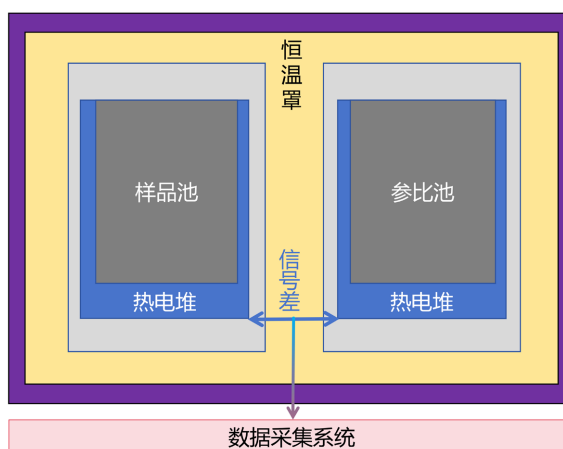


Figure 1. Schematic diagram of typical twin-cell isothermal calorimeter structure
图1. 双杯等热量热计典型结构示意图

等热量热计的主要优点是稳定性好、基线漂移小、测量周期相对较短(数小时至一天)。由于采用主动温控,其对外界环境波动的抑制能力强,适用于实验室和核设施内的常规测量。下面介绍了一些典型的等热量热仪。

3.2.1. 英国 ANTECH 公司

英国 ANTECH 公司的双杯等温量热计等, 其测量不确定度可达 0.3%~1%, 检测限通常在 μW 至 mW 量级。上个世纪 90 年代, 英国 ANTECH 公司就开始研究开发氙的量热装置, 并主要采用双杯对接技术。ANTECH 的量热仪器设计紧凑、操作简便, 被多个国家采购用于日常库存核查。LANL 购置的一台 ANTECH P300 等温氙量热计[15], 声明的测量功率范围 0.005 W~15 W, 但是实际可以检测低至 0.001 W (约 3 mg 氙), 这表明该仪器具有很高的灵敏度和精度。

3.2.2. 德国 TLK

德国 TLK 作为国际氙量热技术的引领者, 其开发的 IGC (Inertial Guidance Control, 惯性制导控制) 系列量热仪是目前国际公认的精度最高的专用氙量热计。IGC 系列的设计源于惯性导航系统中的高精度温度控制技术, 通过将量热计主体置于双壁真空室中, 并采用高真空(10^{-5} mbar)隔热、多层辐射屏蔽和主动温控, 实现了比传统恒温器高三个数量级的温度稳定性[16]。

TLK 在 1994 年公开了第一代 IGC 量热计, 用模拟电加热源校准, 覆盖范围在 1 mW~2 W 之间, 测量结果具有极好的再现性和高精度, 证明了量热计无损测定氙的适用性[17]。2013 年, Bükki-Deme 等[18]总结了 IGC-V0.5 的最新升级成果。他们采用基于 LabVIEW 的新型自动过程控制软件, 重新调谐了三个 PID 控制回路。经过优化后, 在 1 μW 功率水平下的相对测量精度从 60%提升至 17%。该装置特殊的恒温器设计与传统恒温器($\pm 10 \mu\text{K}$ ~ $100 \mu\text{K}$)相比, 它可以达到更好的温度稳定性($\pm 30 \text{ nK}$)。TLK 量热计的结果彼此之间的差异最大在 0.6%以内, 对于含有超过 0.5 mg 氙的样品测量精度可达 0.3%, 并且每个量热计的精度都优于 0.5% [19] [20]。

IGC 系列的成功得益于集成多项技术: 惯性制导恒温技术、高灵敏度碲化铋热电堆传感器、多级 PID 控制算法以及全自动数据采集系统, 为高精度氙量热计的设计提供了范例。

3.2.3. 中国相关研究院所

21 世纪以来, 中国相关机构就针对氙的量热计量陆续开展了研究并设计开发了多种不同规格的量热仪。2010 年, 王国庆等[21]研制的双杯自动化量热测氙装置, 综合应用了双杯技术、热电偶组均布技术和加热电阻预热技术。传统量热计在放入样品后需要等待 15 小时以上达热平衡, 而加热电阻预热技术可将平衡时间大幅缩短到 5~6 小时, 该装置在 300~3000 mW 范围内测量不确定度为 0.4%, 在 30~300 mW 范围内不确定度为 0.6%。中国原子能科学研究院, 刘丽飞等[22]研制的热流型等温双杯量热计, 基于热电堆分区结构与双杯对称设计, 采用了稳态测量模式, 热平衡时间约 8~10 小时, 并可通过智能 PID 控制优化稳定度。另有欧阳慧平等针对一款采用水浴与真空环境双重温度控制的微量热计进行了验证[23], 该装置外层为恒温水浴(控温精度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$), 内层为真空腔体(真空度达 10^{-2} Pa), 通过消除空气对流和传导热损失, 显著降低了本底热噪声。检测限达到 1.28 μW (对应约 4 μg 氙), 测量范围 165~5063 μW , 重复测量标准偏差 1.14%, 与 PVT 法偏差 2.45%。

3.3. 绝热型量热

绝热型量热计的设计理念与等温型相反。它通过绝对屏蔽最大程度减少样品与外界之间的热交换。在这种模式下, 样品产生的热量几乎不会流向环境。通过测量温度随时间的变化率, 结合量热计的热容, 即可计算出样品热功率。日本富山大学 Matsuyama 等[24]基于绝热设计, 设计了一种双杯传导型量热计专门用于高浓度氙水的绝对测量。该量热计采用绝热外套跟踪样品温度, 样品体积仅需 20 cm^3 。测量活度浓度为 46.0 MBq/cm^3 的氙水样品, 结果与液闪计数法高度一致(45.2 ± 2.0 vs $46.0 \pm 0.5 \text{ MBq}/\text{cm}^3$), 探测限评估为 40 MBq (约 0.1 μg 氙)。尽管检测限不及 IGC, 但其结构简单、操作便捷, 适合常规实验室使用。

绝热型量热计不需要测量热流，避免了热阻元件的系统误差，理论上可以达到更高的绝对精度。然而，由于仪器结构复杂，制造成本高，且测量周期较长(数天至数周)无法满足工程需求，仅适用于低功率、长半衰期样品的精确测量，不适用于核材料衡算。

上述量热计的关键性能对比见表 2。

Table 2. Comparison of key performance parameters of the above tritium calorimeters
表 2. 上述氚量热仪关键性能参数对比

仪器名称/型号	测量范围	检测限	测量精度/不确定度	热平衡时间	核心技术特点
ANTECH P300	0.005~15 W (可扩展至 0.001 W)	~3 μW (约 3 mg 氚)	0.3%~1%	未明确	双杯对接技术， 结构紧凑操作简便
TLK IGC-V0.5	1 μW ~2 W	1 μW (约 3 μg)	1 μW 水平: 17%; >0.5 mg 氚: 0.3%	较长 (高精度模式)	惯性制导恒温、 高真空隔热多级 PID、 碲化铋热电堆
双杯自动化量热 测氚装置	30~3000 mW	未明确	300~3000 mW: 0.4%; 30~300 mW: 0.6%	5~6 h (加热电阻 预热技术)	双杯技术 + 热电偶组 均布 + 加热电阻预热 技术
热流型等温双杯 量热计	未明确	未明确	未明确	8~10 h (稳态测量模式)	热电堆分区结构、 双杯对称设计、 智能 PID 控制
微量热计	165~5063 μW	1.28 μW (约 4 μg 氚)	重复性 1.14%; 与 PVT 法偏差 2.45%	未明确	水浴 + 真空双重 温控，消除空气对流 和传热损失
双杯传导型绝热 量热计	适用于高浓度氚水	~40 MBq (约 0.1 μg 氚)	与液闪法偏差 <2% 46.0 vs 45.2 MBq/cm ³	未明确	结构简单、操作便捷、 样品体积小(20 cm ³)

4. 影响量热的关键因素

量热法的测量精度受热力学、仪器工程及环境条件的综合制约，包括温度稳定性、样品形态、测量时间等因素，理解和制约这些影响因素是设计改进高性能氚量热计的关键。

4.1. 温度稳定性与热噪声控制

量热计对温度波动极为敏感。研究表明，在温控不良的环境中，气温的日变化和空调启停导致的短时波动可导致量热计基线漂移达数十 μW ，从而使低活度样品的测量结果完全失效[25]。IGC 系列通过惯性制导控制实现 ± 30 nK 的温度稳定性[18]，是当前最高水平。

在实际工程应用中，不可能所有场合都配备实验室级的恒温环境。因此，升级对温度波动具有更强抑制能力的量热结构(如双杯差分设计、参考池的主动补偿等)是提高工程适用性的重要方向。

4.2. 样品形态与热分布均匀性

样品的几何形状、在样品池中的位置及与池壁的热接触状况直接影响热传递效率[26]。非对称置样会导致热流分布不均，使部分热量通过非标定路径散失，引入系统误差。

可通过以下方式弱化这种影响：优化样品池的热接触面设计(如采用弹性热垫片)；使用导热填充介质(如氮气、氦气或导热硅脂)填充样品与池壁之间的空隙；对于大型量热计，通过在样品池壁布置多组热电堆阵列，对热流分布进行加权积分，从而减小非对称置样带来的误差，在实际使用中实现对非对称贮氚

容器的适应性测量。

4.3. 测量时间与信噪比权衡

对于低活度样品，热功率信号微弱，容易被仪器的本底噪声覆盖。要获得足够的信噪比，需要延长测量时间以进行信号平均。根据信号处理理论，信噪比与测量时间的平方根成正比。因此，将检测限降低一个数量级，测量时间需要增加约 100 倍。这种权衡在低活度测量中十分突出[27]。

微量热计通过提高热绝缘性能(采用真空绝热、多层热屏蔽等)来降低本底噪声，同时采用差分测量架构抵消共模漂移，从而在缩短测量时间的同时维持低检测限。此外，卷积去噪量热法(CDC)等人工智能算法的应用，可以在不显著增加测量时间的情况下提升信号质量，为突破这一权衡提供了新思路。

5. 量热技术的应用

5.1. 量热仪校准技术

量热仪的校准是确保测量结果溯源性和准确性的关键环节。目前氚量热仪的校准主要包括电加热模拟校准和标准源校准两种途径。

1) 电加热模拟校准

电加热校准是目前最常用的方法，通过向样品室置入已知功率的电加热器，模拟氚衰变热功率，建立热功率与输出信号之间的标定关系。TLK 的 IGC 系列量热计即采用模拟电加热源进行校准，覆盖 1 mW~2 W 范围[17]。电加热法的优势在于功率精确可控、溯源链清晰(可溯源至国家电功率基准)，且无需操作放射性物质，安全性高。但需注意电加热器与真实氚样品在热分布特性上的差异——电加热为点源或线源，而氚衰变热为体分布源，这种差异可能引入系统误差，特别是在大体积样品或低热导率基质中。

2) 标准源校准

使用活度经权威机构标定的氚标准源(如氚水、金属氚化物)进行校准，可更真实地反映实际测量条件。美国 LANL 在评估 ANTECH P300 量热计时，即采用已知活度的氚气瓶进行验证[15]。标准源校准的优势在于能够涵盖样品形态、自吸收、热分布等实际因素的影响，但标准源的获取、保存和运输受核材料管制限制，且标准源自身活度会随时间衰变，需定期修正。

3) 交叉验证与比对

国际原子能机构(IAEA)及欧盟联合研究中心(JRC)定期组织氚量热仪国际比对活动，通过循环测量同一组氚样品，评估不同实验室、不同原理量热仪的一致性。此类比对是发现系统偏差、验证校准有效性的的重要手段。TLK 报道其多台 IGC 量热计之间的测量差异最大不超过 0.6% [19][20]，即得益于严格的内部交叉验证制度。

5.2. 量热仪测量不确定度评定

量热法作为绝对计量方法，其测量不确定度评定需遵循《测量不确定度表示指南》(GUM)及 ASTM C1458 标准的要求[5]。氚量热测量的合成不确定度主要来源包括：

A 类不确定度(统计分量)：

- 1) 重复测量引入的标准偏差(如 TLK IGC 在 1 μ W 水平下重复性不确定度约 17% [18])；
- 2) 基线漂移和噪声的统计涨落。

B 类不确定度(系统分量)：

- 1) 电加热校准源的功率不确定度(通常<0.1%)；
- 2) 温度传感器灵敏度及热电堆标定系数的不确定度；

- 3) 热泄漏修正残余误差(绝热型)或帕尔贴效率因子(等温型);
- 4) 氚半衰期和平均衰变能推荐值的不确定度(见第 2.2 节);
- 5) 样品自吸收和几何效率修正。

ASTM C1458-00 标准提供了完整的氚量热测量不确定度评估框架, 包括各分量的识别、量化方法和合成计算流程[5]。对于高精度量热计(如 TLK IGC), 在 >0.5 mg 氚样品条件下, 合成相对标准不确定度可达 0.3%~0.5% [19] [20]; 而对于低活度样品, 统计分量主导, 不确定度显著增大。

5.3. 量热与其他检测技术的协同应用

量热法虽为氚计量的基准方法, 但在实际核材料管控体系中, 通常与多种无损/有损检测技术协同使用, 形成互补的测量矩阵。

1) 与 PVT 法、质量法的协同

如第 1 节所述, PVT 法和质量法操作简便、速度快, 适用于工艺线上的粗略估算和日常盘存; 量热法则用于定期的高精度核查和争议仲裁。美国萨凡纳河国家实验室(SRNL)的氚物料衡算体系即采用“PVT/质量法日常跟踪 + 量热法年度核查”的模式。

2) 与质谱法、气相色谱法的协同

对于含氚气体或氢同位素混合物, 质谱法(如磁扇形质谱、四极质谱)和气相色谱法可精确测定氚的丰度和同位素组成, 但无法直接给出总氚量。量热法测量总热功率(与总氚量成正比), 结合质谱/色谱给出的丰度数据, 可分别计算各同位素分量, 实现完整的同位素衡算。

3) 与液体闪烁计数法(LSC)的协同

LSC 是氚活度测量的经典有损方法, 灵敏度高(可测 Bq 级), 但需要取样、制样和闪烁液, 属于破坏性分析。Matsuyama 等[24]将其绝热量热计结果与 LSC 进行了直接比对(45.2 ± 2.0 vs 46.0 ± 0.5 MBq/cm³), 验证了量热法的准确性。在核废料表征中, 通常采用“量热法无损初筛 + LSC 精确取样分析”的组合策略。

4) 与 γ 能谱法的协同

对于含氚同时含其他 γ 发射核素(如 ⁶⁰Co、¹³⁷Cs)的复杂样品, γ 能谱法可快速识别和定量其他核素, 而量热法测量总热功率。通过 γ 能谱扣除其他核素的衰变热贡献, 可反推纯氚分量, 实现混合核素样品中的氚定量。

6. 总结与展望

量热技术的核心优势在于绝对计量特性和无损检测能力, 这使其在氚计量领域占据不可替代的地位, 长期占据核材料管控领域的重要地位。但其热平衡时间较长、测量效率低、人工干预环节多, 不能实现实时监测需求, 未来可以考虑从离线定期计量向在线连续监控转型; 常规绝热量热仪虽结构成熟、环境适应性强, 仍保有一定应用场景, 但复杂的绝热结构设计、高昂的高灵敏度传感器成本及对操作人员经验的依赖限制了其进一步推广。相比之下, 智能化、模块化、微型化的量热技术作为发展的趋势, 降低探测下限、缩短测量周期、自动化程度高、环境适应性好, 在痕量氚监测与极端工况应用中展现出优势, 但依赖于高灵敏度温度传感器、先进信号处理算法及精密温控系统的集成, 存在传感器稳定性、算法可靠性及极端环境兼容性等挑战。针对这一瓶颈, 机器学习自适应温控、模块化可扩展架构及原位嵌入式探头设计的技术路线展现出重要价值: 它可以降低人工干预引入的不确定度, 突破单一量程对应用场景的限制, 还摆脱了传统量热技术对离线采样和定期送检模式的依赖, 在低检测限、短周期、在线原位检测及复杂环境适应方面具有重要发展潜力。

未来,量热技术将沿着智能化、低检测限、短测量周期、高精度及在线原位检测等方向持续演进。同时,PVT法、质量法可以辅助量热法使用,并根据不同的测量场景和需求,结合质谱法、气相色谱法、拉曼光谱法、电离室法、液体闪烁计数法、韧致辐射测量法及氚成像等手段,构建更为完善、精准且可靠的氚计量体系,以满足核材料管控、聚变能源开发及环境监测等多领域的应用需求。

参考文献

- [1] 赵林杰,肖成建,龙兴贵,等.聚变能源中的氚化学与氚工艺研究进展及展望[J].核化学与放射化学,2019,41(1):40-59.
- [2] Hara, M., Kawamura, Y. and Tanabe, T. (2017) Tritium Measurement I—Tritium in Gas, Liquid, and Solid. In: Tanabe, T., Ed., *Tritium: Fuel of Fusion Reactors*, Springer Japan, 137-164. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56460-7_7
- [3] Filer, C.N. (2018) Synthesis and Characterization of Tritium-Labelled Substances. *Applied Radiation and Isotopes*, **137**, 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.029>
- [4] Bachelet, F., Clouard, S., Lis, A., André, R. and Mathonat, C. (2020) Calorimetry: An NDA Method for Tritium Measurement and Accountancy. *Fusion Science and Technology*, **76**, 699-702. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1766273>
- [5] ASTM International (2000) Standard Test Method for Nondestructive Assay of Plutonium, Tritium and ^{241}Am by Calorimetric Assay: ASTM C1458-00. ASTM International.
- [6] Jenks, G.H., Sweeton, F.H. and Ghormley, J.A. (1950) A Precise Determination of the Half-Life and Average Energy of Tritium Decay. *Physical Review*, **80**, 990-995. <https://doi.org/10.1103/physrev.80.990>
- [7] Hans, K., Reinhard, K. and Rolf, H. (1992) Tritium Inventory Measurements Using Calorimetry. *Fusion Technology*, **21**, 412-418. <https://doi.org/10.13182/fst92-a29780>
- [8] Pretzl, K. (2009) Physics with Calorimeters. *Journal of Physics: Conference Series*, **160**, Article ID: 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012001>
- [9] Croce, M.P., Bracken, D.S., Likes, R.N., Rudy, C.R. and Santi, P.A. (2024) Principles of Calorimetric Assay. In: Geist, W.H., et al., Eds., *Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security*, Springer, 657-675. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58277-6_23
- [10] Bracken, D.S. and Rudy, C.R. (2007) Principles and Applications of Calorimetric Assay. LA-UR-07-5226, Los Alamos National Laboratory.
- [11] Hothar, M. and Wadsö, L. (2024) Accurate Heat Capacity Determination of Solids and Liquids Using a Heat Conduction Calorimeter. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **149**, 2179-2188. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12824-8>
- [12] Matsuyama, M. and Hara, M. (2008) Standardization of Tritium Measuring Devices Based on a High-Sensitivity Calorimeter. *Fusion Science and Technology*, **54**, 182-185.
- [13] 仪器信息网.法国塞塔拉姆 LVC 大容量核量热仪特点[EB/OL]. https://www.yiqi.com/technews/detail_75dcc5f7b62e9dcc.html, 2025-04-24.
- [14] Hemmerich, J.L., Serio, L. and Milverton, P. (1994) High-Resolution Tritium Calorimetry Based on Inertial Temperature Control. *Review of Scientific Instruments*, **65**, 1616-1620. <https://doi.org/10.1063/1.1144902>
- [15] West, D.S., Frame, K.J., Thompson, J. and Ticknor, L.O. (2008) Evaluation of a Newly Developed Tritium Calorimeter at Los Alamos National Laboratory. *Fusion Science and Technology*, **54**, 178-181. <https://doi.org/10.13182/fst08-a1790>
- [16] Dörr, L., Besserer, U., Grunhagen, S., Glugla, M., Kloppe, B., Sirch, M., et al. (2005) High Resolution Vacuum Calorimeter. *Fusion Science and Technology*, **48**, 358-361. <https://doi.org/10.13182/fst05-a942>
- [17] Kapulla, H. and Heine, R. (1995) Experimental Results and Experience with the KfK-Tritium-Calorimeter. *Fusion Technology*, **28**, 1020-1025. <https://doi.org/10.13182/fst95-a30540>
- [18] Bükki-Deme, A., Alecu, C.G., Kloppe, B. and Bornschein, B. (2013) First Results with the Upgraded TLK Tritium Calorimeter IGC-V0.5. *Fusion Engineering and Design*, **88**, 2865-2869. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.066>
- [19] Bükki-Deme, A., Alecu, C.G., Kloppe, B. and Bornschein, B. (2015) Current Status of Tritium Calorimetry at TLK. *Fusion Science and Technology*, **67**, 282-285. <https://doi.org/10.13182/fst14-t11>
- [20] Alecu, C.G., Besserer, U., Bornschein, B., Kloppe, B., Köllö, Z. and Wendel, J. (2011) Reachable Accuracy and Precision for Tritium Measurements by Calorimetry at TLK. *Fusion Science and Technology*, **60**, 937-940. <https://doi.org/10.13182/fst11-a12569>

-
- [21] 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.
- [22] 欧阳慧平, 袁晓明, 何长水, 等. 氚微量热计标定及含氚样品量热验证[J]. 同位素, 2023, 36(4): 440-445.
- [23] 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.
- [24] Matsuyama, M., Takatsuka, K. and Hara, M. (2010) Sensitivity of a Specially Designed Calorimeter for Absolute Evaluation of Tritium Concentration in Water. *Fusion Engineering and Design*, **85**, 2045-2048. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.07.025>
- [25] Cameron, M.A. (2007) Weather-Related Variability of Calorimeter Performance in a Poorly Controlled Environment. Hanford Site (HNF).
- [26] 罗学建, 罗文华, 蒋国强, 等. 量热法测量贮氚容器中的氚[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 174-178.
- [27] Zhang, W.S. (2024) Convolutional Denoising for Large-Volume Seebeck Calorimeter. *Thermochimica Acta*, **736**, Article ID: 179760. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179760>