

超灵敏度真空检漏技术进展

董云宁^{1,2*} 闫睿² 梁进智³ 魏萌萌^{1,2} 余荣^{1,2} 崔健^{1,2} 崔玉妹^{1,2} 佟亚珍^{1,2}
王欢^{1,2} 王汐月^{1,2} 陈俊儒^{1,2} 杨传森^{1,2} 齐京^{2,4} 卢耀文^{1,2}

(1. 北京东方计量测试研究所 北京 100029; 2. 北京市真空计量检测工程技术研究中心 北京 100029;
3. 北京华北莱茵光电技术有限公司 北京 100015; 4. 清华大学 北京 100084)

The Development of Ultrasensitive Leak Detection Technology

DONG Yunning^{1,2*}, YAN Rui², LIANG Jinzhi³, WEI Mengmeng^{1,2}, YU Rong^{1,2}, CUI Jian^{1,2}, CUI Yumei^{1,2},
TONG Yazhen^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, WANG Xiyue^{1,2}, CHEN Junru^{1,2}, YANG Chuansen^{1,2}, QI Jing^{2,4}, LU Yaowen^{1,2}
(1. Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100029, China; 2. Beijing Engineering Technology Research Center of
Vacuum Measurement and Test, Beijing 100029, China; 3. Beijing North China Laiyin Optoelectronics Technology Co., Ltd,
Beijing 100015; 4. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The present situation and development of ultrasensitive leak detection technology in the world is introduced in this paper. The leak detection with leakage rate less than 10^{-12} Pa·m³/s is called ultrasensitive leak detection, which is an important development to solve the leak detection requirement of long life and high reliability vacuum devices. Due to the limitation of the lower limit of mass spectrum analysis and micro current measurement of general commercial leak detector, the lower limit of actual leakage measurement is 10^{-11} Pa·m³/s, and the lower limit of leak detection can reach 10^{-12} Pa·m³/s after software correction. In order to achieve ultrasensitive leak detection, the international research on relevant technologies began in the 1960s, mainly focusing on the extension of the lower limit of leak detection and the improvement of leak detection accuracy. China has broken through many technologies in ultrasensitive leak detection. The lower limit of leak detection has reached 5×10^{-16} Pa·m³/s, and the combined standard uncertainty of leak detection results has been reduced to less than 15%.

Keywords Ultrasensitive vacuum leak detection, Accumulation comparison method, Lower limit of leak detection, Leak detection accuracy, Vacuum devices

摘要 文章主要介绍国内外超灵敏度真空检漏技术的现状与发展。超灵敏度真空检漏是指对小于 10^{-12} Pa·m³/s 的漏率进行检测的技术,它是高可靠长寿命真空器件封装的重要诊断手段。当前普通商用检漏仪受质谱分析下限和微小电流测量下限等因素的限制,其实际检漏下限一般为 10^{-11} Pa·m³/s 量级,采用软件修正后显示的检漏下限可达 10^{-12} Pa·m³/s 量级。为了解决对微小漏率的超高灵敏度检测,国际上自上世纪 60 年代开始相关技术研究,主要围绕检漏下限的延伸和检漏精度的提高两方面开展工作。国内突破了多项技术难题,最新研制出下限为 5×10^{-16} Pa·m³/s 的超灵敏度真空检漏仪,并将检漏结果的合成标准不确定度减小到 15% 以内。

关键词 超灵敏度真空检漏 累积比较法 检漏下限 检漏精度 真空器件

中图分类号: TB77

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjst.202108018

超灵敏度真空检漏技术是当前高可靠长寿命真空器件必须解决的难题,也是真空检漏技术下限延伸的重要研究内容。将漏率小于 10^{-12} Pa·m³/s 的真空检漏称为超灵敏度真空检漏,该漏率超出了传

统质谱检漏仪的检漏下限,是微电子、半导体、航空航天、核工业、船舶等应用领域的器件封装性能评价的重要工具和保障技术。随着科技进步,各类真空器件的集成度愈来愈高,而体积却越来越小,真

空度的维持是影响真空器件寿命和可靠性的主要因素,真空度主要取决于封装时的漏率检测和器件内部的材料放气。例如一个体积为 1 cm^3 的真空器件,假设封装时的内部气体压力为 10^{-5} Pa ,假设器件密封时的漏率为 $1\times 10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,经过一年时间,仅密封泄漏导致器件内部压力将升高至 3 Pa ,远高于器件正常工作所需压力并导致器件失效,为此超灵敏度真空检漏技术是高可靠长寿命器件必须解决的难题。

国际上在上世纪五十年代就开始了超灵敏度真空检漏技术的研究,经过几十年的发展取得了一定的技术突破和进展,近年来国内外均推出了超灵敏度真空检漏相关成熟产品。本文主要综述国际上超灵敏度真空检漏技术的进展及成果,为相关研究者提供参考资料,关于提高超灵敏度真空检漏结果的精度及校准相关研究进展将另撰文发表。

1 超灵敏度真空检漏技术进展

传统氦质谱真空检漏的方法是用质谱计作为示漏气体的测量工具,采用动态的返流技术手段实现检漏,该方法的优势是检漏速度快、效率高、成本低,不足之处是由于质谱计测量下线的限制无法测量小于 $10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的微小漏率。普通氦质谱检漏仪的工作原理如图1所示,被检测漏孔泄漏的示漏 He 气引入检漏仪后,大部分被真空泵抽走,只有很少一部分通过返流进入质谱分析室中,为此形成了

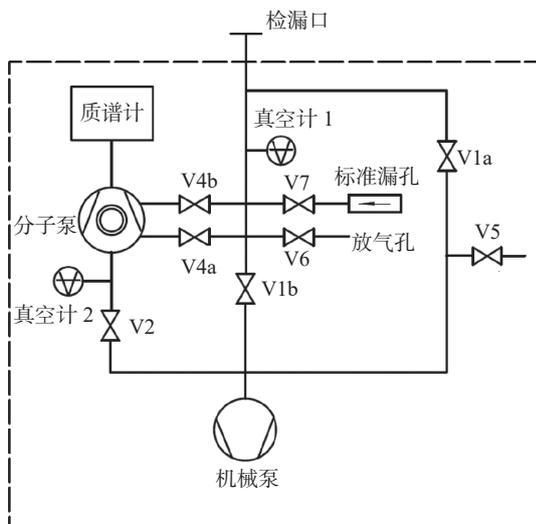


图1 常用氦质谱检漏仪工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of general helium mass spectrometer leak detector

(图中, V1a、V1b、V2、V4-V7 为真空阀门)

抽气、返流、检漏的一个动态过程。检漏核心仪器采用磁偏转质谱计,检漏结果是用检漏仪自带的一台固定漏率的标准漏孔作为参考标准计算获得。这种采用动态的检漏方法,只有很少一部分气体返流进入质谱分析室,对于更小的泄漏漏率,由于磁偏转质谱计的测量下限限制,无法测量到微小 He 气的离子流信号。

为实现漏率小于 $10^{-12}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的漏孔的检测,国内外相关研究工作者在上世纪 50 年代末开始研究,研究工作的焦点主要集中在延伸检漏下限及提高检漏结果的精度。其中,检漏下限的延伸主要通过两种方法实现,一是延伸质谱计测量示漏气体分压力的下限,二是提升检漏过程中示漏气体的分压力。

1.1 国外超灵敏度真空检漏技术进展

(1) 双极串联磁偏转质谱检漏技术

基于磁偏转质谱的超灵敏度真空检漏技术代表研究者是美国学者 Peters J L。早在 1959 年, Peters 研制出型号为 700B 的超灵敏度真空检漏仪^[1],该仪器的实物如图 2 所示。该检漏仪主要解决了示漏 He 气被电离后的分离能力问题,降低了检漏本底噪声的影响,目的是延伸质谱计的测量下限。传统检漏仪采用一台磁偏转分析器,质谱分析室内的工作压力一般为 $(10^{-2}\sim 10^{-3})\text{ Pa}$,当示漏 He 电离后, He 离子被气体分子碰撞散射的相对较多,并且从离子源出来的离子能量不均匀及空间电荷的散焦作用等因素导致示漏 He 气峰附近的其它质谱峰加宽,产生将 He 峰淹没的现象,另外,与 He 离子动量相同或者接近的非 He 离子所形成的离子将引起较大的本底噪声,其基本原理如图 3 所示。Peters J L 采用了两极串联结构的磁偏转质谱计为检漏核心部件,在图 4 中间狭缝 S2 与邻近的挡板之间设计了加速电场,使离子在进入第二个分析器前被再次加速,将通过第一台分析器后的非 He 离子分离,目的是非 He 离子通过第二台分析器后获得的动量与 He 离子不相同。为此, Peters J L 利用串联结构的双极分析器有效的分离了 He 离子和非 He 离子,减小了本底噪声,从而将检漏下限延伸至 $10^{-14}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。由于该检漏仪的体积庞大,成本比较高,后续尚未得到推广应用。

(2) 低温吸附累积法超灵敏度真空检漏技术

1994 年,学者 Mynemi 提出用低温吸附的方法

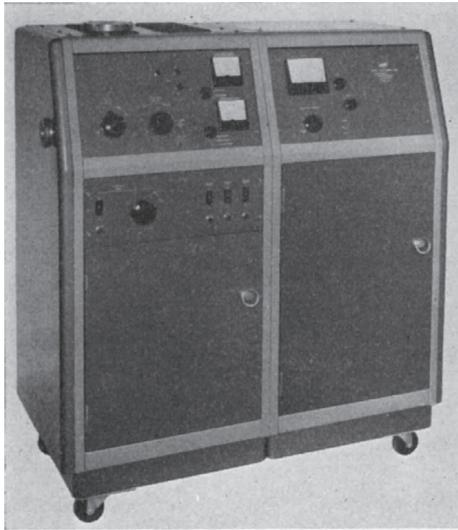


图2 Peters J L 研制的 700B 超灵敏度真空检漏仪

Fig. 2 The ultra-sensitive leak detector developed by Peters J L

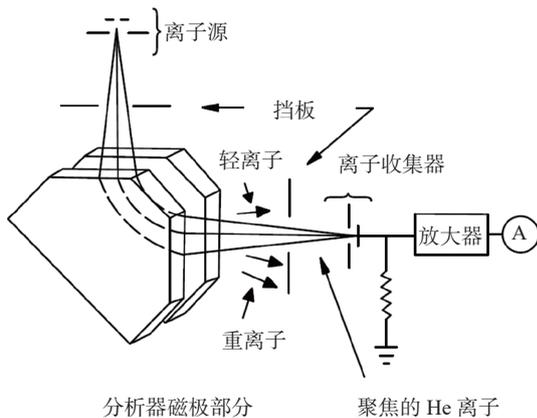


图3 普通检漏仪磁偏转分析器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the magnetic deflection analyzer for common leak detector

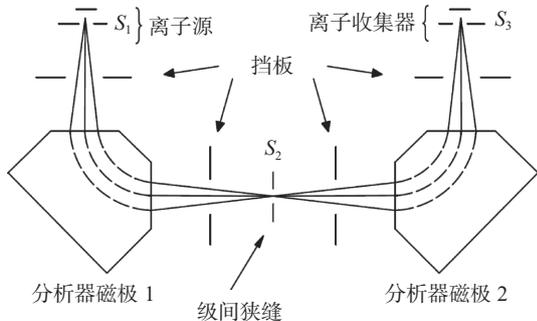


图4 Peters J L 研制的磁偏转质谱计原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the magnetic deflection mass spectrometer developed by Peters J L

实现超灵敏度真空检漏^[2], 研制的样机实物如图 5 所示。该检漏仪通过低温泵及其管道组成的真空

室作为累积室, 采用累积方法进行检漏, 用四极质谱计分别测量被检测泄漏漏孔和标准漏孔在累积过程中的示漏 He 气离子流变化, 通过计算得到漏率结果。累积过程中采用低温泵抽气, 低温泵抽气的特点是对 He 气的抽速为零, 这种设计一方面保证了四极质谱计正常工作所需的真空环境, 另一方面低温泵抽气不影响示漏 He 气在累积室中的浓度累积。Mynemi 研制的设备实现了 $1 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的检漏下限, 但研制样机重量超过 1000 kg、体积庞大、成本昂贵及累积时间长等, 该技术也没有得到推广应用。



图5 Mynemi 用低温吸附方法研制的超灵敏度真空检漏仪样机

Fig. 5 The ultra-sensitive leak detector developed by Mynemi using cryopump

2010 年, 美国 INFICON 公司在 Mynemi 研究成果的基础上推出型号为 Pernicka 700H 商品化超灵敏度真空检漏仪, 其原理结构如图 6 所示, 实物如图 7 所示。该检漏仪的重量在 240 kg 以上, 说明书给出的最小可检漏率为 $4 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[3]。该检漏仪主要由检漏室、低温抽气系统、四极质谱计、标准漏孔等组成, 检漏过程是在被检测器件的示漏气体引入后, 用低温泵对检漏室抽气并维持高真空, 用四极质谱计测量累积过程中的示漏气体离子流随着时间的变化量, 然后关闭被检测器件与检漏室连接的阀门, 将标准漏孔提供的示漏气体引入检漏室, 用四极质谱计测量累积过程中的示漏气体离子流随着时间的变化量, 通过线性递推的方法计算得到检漏结果。由于当前商业标准漏孔的下限为 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 该漏孔自身提供漏率的偏差在 10% 以上, 当其作为参考标准用于实现小于 $10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的漏率检测时, 由于标准漏率和被检测漏率相差三个数量级以上, 质谱计的非线性导致通过线性递推的方法计算结果的最大偏差可达一个数量级以上。这意味着在实际应用中对于设计寿命为 10 年的真

空器件,由于检漏的偏差导致实际寿命可能仅为1年。

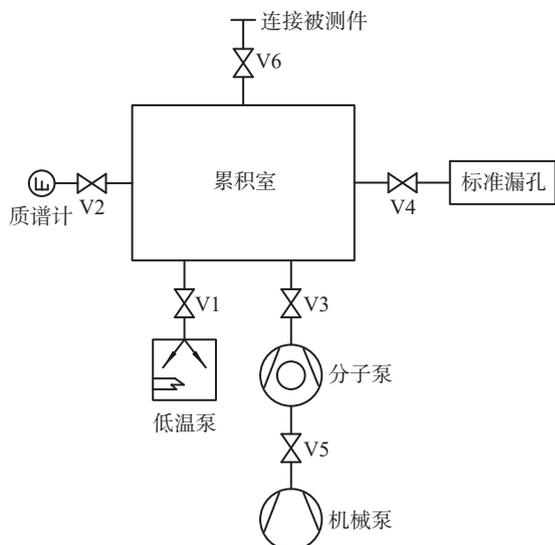


图6 Pernicka 700H 检漏仪原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the Pernicka 700H leak detector (图中, V1-V6 为真空阀门)



图7 Pernicka 700H 检漏仪实物图

Fig. 7 Picture of the Pernicka 700H leak detector

(3) 静态累积法超灵敏度真空检漏技术

1978年,学者 Powell J P 和 Momnllan D 通过静态累积测量法,研制出下限可达 $1 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的超灵敏检漏系统^[4]。其基本原理是利用选择性抽气的真空泵让示漏气体累积一段时间,以提高检漏灵敏度。实践证明这是一种有效提高检漏灵敏度的

方法,可使仪器的最小可检漏率提高两个数量级以上。对于密封真空器件,在其封口前先对部件用累积法检漏,对密封后的真空器件用背压检漏。

1992年,美国学者 Berguist 和 Sasaki 用四极质谱计实现高灵敏度检漏的基础上,将其与累积法结合起来,利用吸气剂泵能够抽除氢气等活性气体,但对惰性气体无抽速的特点,研制出检漏下限可达 $10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的一体化超灵敏度真空检漏仪^[5]。该技术当时在红外探测技术所用小杜瓦瓶等器件的超灵敏检漏中得到实际应用,在该器件的性能测试、合格筛选及质量控制等方面展现了价值。这一项创新成果使得微电子封装器件的整体泄漏得到检测,微型真空器件的可靠性得到很大程度提升,推进了长寿命高可靠微型真空器件的发展。

Berguist 等研制的装置体积大、成本高,不适于广泛商品化使用。在上世纪 90 年代中期,美国 Quantum Mechanics 公司将 Berguist 等的研究成果商品化,研制出基于累积方法的超灵敏度真空检漏仪产品^[6],用四极质谱计测量示漏 He 气的分压力,实现了 $1 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的检漏下限,其实物见图 8 所示。

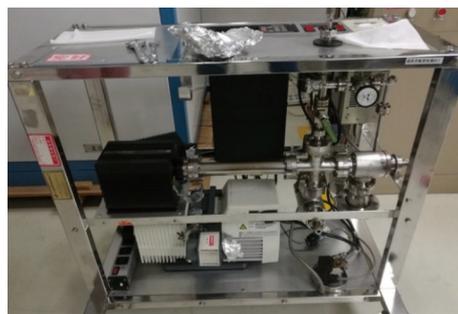


图8 美国量子公司超灵敏度真空检漏仪实物图

Fig. 8 Picture of the ultra-sensitive leak detector developed by Quantum Mechanics

1.2 国内超灵敏度真空检漏技术进展

在中国,清华大学上世纪 50 年代开始真空检漏技术相关研究,查良镇教授在 1961 年研制出我国第一台检漏仪,其型号为 6104,检漏下限为 $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[7],并实现了检漏灵敏度的实时校准^[8]。

2000年,清华大学陈旭教授等研制出中国第一台超灵敏度真空检漏仪,原理如图 9 所示,其检漏下限可达 $10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级^[9]。图中, V1~V4 为手动全金属角阀, V5~V11 为小波纹管阀, RP 为薄膜泵和分子泵组成的无油前级泵, TP 为主分子泵, IP 为溅

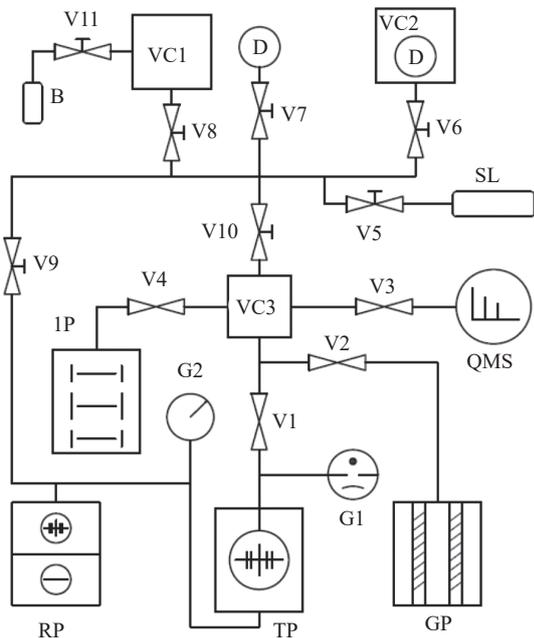


图9 清华大学陈旭等研制出的我国第一台超灵敏度真空检漏仪原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the first ultra-sensitive leak detector in China developed by Chen Xu of Tsinghua University

射离子泵, GP 为吸气剂泵, QMS 为四极质谱计, G1 为极高真空 B-A 计, G2 为热偶计, VC1 为充压室, VC2 为真空室, VC3 为累积室, B 为 He 气瓶, D 为被检件, SL 为标准漏孔。该检漏仪采用体积比较小的真空室作为累积室, 用 He 气作为示漏气体, 采用一台漏率为 $10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级的标准漏孔作为参考标准, 用四极质谱计测量示漏 He 气, 通过累积的方法测试被检器件泄漏的示漏气体。装置用吸气剂泵对累积室进行抽气, 由于吸气剂泵具有对 He 气抽速为零、对活性气体抽速很大的特点, 这样一方面保证了累积过程中四极质谱计能够在正常的真空环境下工作, 另一方面不影响示漏气体 He 气在累积室中浓度的变化。真空获得系统选用薄膜泵和分子泵组成的无油机组作为前级泵, 主泵采用分子泵, 同时配置了溅射离子泵, 使得分子泵系统关闭时累积室和四极质谱计能维持在超高真空。另外, 为了减小示漏气体本底的影响, 整套系统均采用全金属密封结构, 避免橡胶类密封圈可能带来的泄漏和气体吸附问题, 并配置烘烤除气系统, 累积室可获得 10^{-8} Pa 量级的极限真空度, 为检漏下限延伸提供了基础。

2003 年, 陈旭教授对原有的累积室进行了重新

设计, 选用了高灵敏度的四极质谱计测量示漏 He 气的分压力, 同时对真空管道和真空室进行了特殊的超高真空除气及工艺处理, 将检漏下限延伸至 $10^{-15} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级^[10-11], 但该装置仍采用标准漏孔标定检漏结果, 尚未解决检漏全量程范围内的漏率标定技术难题, 所研制的超灵敏度真空检漏装置如图 10 所示。



图10 清华大学陈旭等研制出下限为 $10^{-15} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级的超灵敏度真空检漏仪

Fig. 10 Picture of the ultra-sensitive leak detector developed by Chen Xu of Tsinghua University with the lower limit of $10^{-15} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ level

2017 年, 北京东方计量测试研究所卢耀文等在清华大学研究的基础上开展了超灵敏度真空检漏技术研究和设备优化设计工作。一方面优化设计了累积室, 并对其内壁进行镀膜工艺处理, 有效地提升了累积室内表面的光洁度, 减小了表面对 He 气分子的吸附能力, 解决了延伸检漏下限本底示漏气体影响的关键因素; 另一方面提出累积比较检漏方法, 将研制出下限为 $5\times 10^{-16} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的标准气体流量计作为参考标准实现了下限为 $5\times 10^{-16} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的超灵敏度真空检漏, 解决了检漏结果的量值溯源问题, 并开发出相应的商用化产品^[12], 原理如图 11 所示。采用下限为 $5\times 10^{-16} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的流量计提供高精度、可变流量的标准气体流量作为参考标准^[13-16], 检漏用四极质谱计作为比较器, 通过分别测量标准气体流量计和被检测器件泄漏累积过程的 He 气离

子流变化率,通过计算得到检漏结果,产品实物如图12所示。

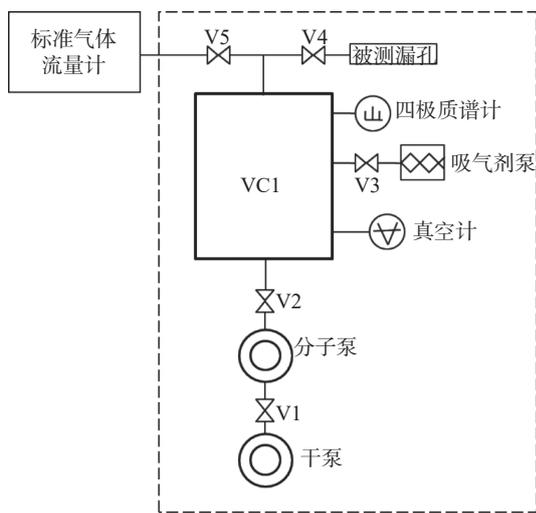


图11 卢耀文等设计的超灵敏度真空检漏装置原理图

Fig. 11 Schematic diagram of the ultra-sensitive leak detector developed by Lu Yaowen



图12 卢耀文等研制出下限为 $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的超灵敏度真空检漏仪实物图

Fig. 12 Picture of the ultra-sensitive leak detector developed by Lu Yaowen with the lower limit of $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

卢耀文等研制的超灵敏度真空检漏仪主要由质谱分析系统和标准气体流量计两部分组成,其中质谱分析系统的原理基于累积比较法,与在清华大学设计的超灵敏度真空检漏仪相近,累积过程同样

采用吸气剂泵实现真空度的维持,不同的是采用集成化产品化思路重新进行了结构设计和配置,累积室的体积更小,采用无油分子泵机组作为主抽泵,通过优选材料、结构优化设计和一系列超高真空特殊工艺处理实现了累积室示漏 He 气本底的降低和控制,将检漏下限延伸至 $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。标准气体流量计部分基于固定流导法原理,研制出流导值为 $10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ 量级的固定流导元件,结合直接调气、膨胀衰减、配置混合气体等多种方法为流导元件提供低至 10^{-6} Pa 的 He 气分压力,从而实现了下限为 $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的高精度、可调的标准气体流量。使用该标准气体流量计作为参考标准,取代偏差较大的传统标准漏孔,在累积法检漏时可提供与被检漏率同量级、尽可能接近的标准气体流量,避免了由于质谱计非线性引入的较大偏差,从根本上解决了检漏结果的正确性和量值溯源问题,将检漏结果的合成标准不确定度减小到 15% 以内。

2 结论

超灵敏度真空检漏技术是高可靠长寿命真空器件封装检漏的关键技术,在微电子、半导体、航空航天、核工业、船舶等领域具有广泛应用需求。经过几十年的发展,取得了重要的技术进展,并推出了一些商品化产品,例如 INFICON 公司开发出的 Pernicka 700H 产品,检漏下限是 $4 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。在中国,清华大学经过几十年的研究和技术突破,研制出下限为 $1 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的超灵敏度真空检漏仪。北京东方计量测试研究所联合清华大学在原有基础上研制出下限为 $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的超灵敏度真空检漏仪,并将新研制的下限为 $5 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的标准气体流量计集成在装置上,将检漏结果的不确定度减小到 15% 以内,实现了国产化商业产品。这些研究成果对于开展长寿命高可靠真空器件的封装和检漏相关工作具有参考价值。后续超灵敏度真空检漏技术一方面在检漏下限延伸、检漏结果准确性提升方面继续开展相关深入的技术研究,另一方面开展与具体应用需求相结合的研究工作,解决应用领域对超灵敏度真空检漏技术的需求,提升真空产品的寿命和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Peters J L. An ultra-sensitive mass spectrometer leak detector and its application to vacuum technology[M]//

- Meissner C R. Vacuum technology transactions. London: Pergamon Press, 2013: 94–96
- [2] G. R. Mynemi, U. S. Pat. 5, 343, 740, 1994
- [3] <https://www.inficon.com/media/5768/download/Pernicka-700H-CHLD-Operating-instructions-jin76aen1-04-%281911%29.pdf?v=1&inline=true>
- [4] Zhu Y F, Lu Y P, Li H Y, et al. Mini-leak detection for metal Dewar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(2): 143–146,154 (朱颖峰, 卢云鹏, 李海英, 等. 金属杜瓦瓶微小漏率检测[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(2): 143–146,154(in chinese))
- [5] Bergquist L E, Sasaki Y T. Innovations in helium leak detector systems[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1992, 10(4): 2650–2654
- [6] Quantum Mechanics Corp. Operation manual of ultra-15 Spartan[R]. 1998
- [7] 查良镇, 薛祖庆, 申功运, 等. 6104 质谱探漏仪[R]. 中华人民共和国科学技术委员会研究报告第0239号, 1965
- [8] Zha L Z, Xue Z C. The sensitivity and its calibration of mas spectrometer leak detector[J]. *Journal of Tsinghua University*, 1965, 12(2): 7–22 (查良镇, 薛祖庆. 质谱探漏仪的灵敏度及其核准[J]. *清华大学学报*, 1965, 12(2): 7–22(in chinese))
- [9] Chen P, Chen X, Jin Q J, et al. New experimental results of an extra-high sensitive MSLD[J]. *Vacuum*, 2003(3): 38–42 (陈娉, 陈旭, 金奇计, 等. 超灵敏度质谱检漏实验的新结果[J]. *真空*, 2003(3): 38–42(in chinese))
- [10] Chen X, Xiao L B, Huang T B, et al. Real time calibration for ultrasensitive leak detection[J]. *Vacuum*, 2006, 81(3): 257–259
- [11] Chen X, Huang T B, Wang L G, et al. Ultrasensitive leak detection during ultrahigh vacuum evacuation by quadrupole mass spectrometer[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2006, 24(1): 91–94
- [12] Lu Y W, Li D T, Qi J, et al. Design of ultrasensitive leak detector with lower detection limit of 5×10^{-16} Pa·m³/s[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(1): 1–5 (卢耀文, 李得天, 齐京, 等. 一种下限为 5×10^{-16} Pa·m³/s 的高精度超灵敏度检漏装置[J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(1): 1–5(in chinese))
- [13] Lu Y W, Chen X, Li D T, et al. A Novel vacuum leak calibration apparatus with lower limit of 1.3×10^{-14} Pa·m³/s [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, 34(5): 504–509 (卢耀文, 陈旭, 李得天, 等. 一种下限为 1.3×10^{-14} Pa·m³/s 的真空漏孔校准装置[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(5): 504–509(in chinese))
- [14] Lu Y W, Dong Y N, Yang C S, et al. Anovel design of standard gas flowmeter with therange of (10^{-5} - 10^{-16}) Pa·m³/s[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(5): 422–426 (卢耀文, 董云宁, 杨传森, 等. 一种(10^{-5} - 10^{-16}) Pa·m³/s 标准气体流量计的设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(5): 422–426(in chinese))
- [15] Lu Y W, Wu D, Chen C, et al. Novel standard gas flowmeter covering (10^{-1} ~ 10^{-10})Pa·m³/s range: an instrumentation study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(7): 674–678 (卢耀文, 吴端, 陈春, 等. 一种(10^{-1} ~ 10^{-10}) Pa·m³/s 标准气体流量计的设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(7): 674–678(in chinese))
- [16] Lu Y W, Dong Y N, Yan R, et al. Lab-built test-platform for pumping-speed measurement and calibration of CF400 molecular pump[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(5): 416–420 (卢耀文, 董云宁, 闫睿, 等. 一种基于CF400接口分子泵抽速测试装置[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(5): 416–420(in chinese))