

# 车载 LNG 气瓶绝热性能定期检测方法分析

丁 栋, 陈 联, 孙冬花, 朱建炳

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 车载 LNG 气瓶采用真空绝热技术实现 LNG 的长期贮存, 达到节能减排, 低温绝热性能是衡量产品综合性能的重要依据之一。目前, 车载 LNG 气瓶的低温绝热性能在出厂前已经进行了检测, 国家已经建立了相关测试标准和判别标准, 规定了检测方法和评价依据, 但使用过程中的绝热性能定期检测一直是行业内的短板, 相关标准和法规还不完善, 存在使用安全隐患。通过结合车载 LNG 气瓶的产业现状, 分析了车载 LNG 气瓶定期检测现状, 在此基础上提出了车载 LNG 气瓶绝热性能定期检测的检测流程、检测方法、判别依据及验证要求等。

**关键词:** 车载 LNG 绝热气瓶; 定期检测; 绝热性能

中图分类号: TB61\*1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2016)03-0157-06

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2016.03.007

## ANALYSIS OF PERIODIC INSPECTION METHOD FOR THE ADIABATIC PERFORMANCE OF LNG IN VEHICLE

DING Dong, CHEN Lian, SUN Dong-hua, ZHU Jian-bing

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** On the long term storage of LNG by using vacuum insulation technology in vehicle LNG adiabatic cylinder to achieve energy conservation and emissions reduction requirements, low temperature insulation performance is one of the important basis to measure the comprehensive performance of the product. At present, low temperature performance of the on-board LNG adiabatic cylinder has been detected before the factory, the relevant testing methods and standards have been established in the country, the detection method and the evaluation basis are provided. However, the periodic detection of on-board LNG adiabatic cylinder has always been the short board of the industry, the relevant standards and regulations are not perfect, there exists the security risks. This paper is based on the annual output of the LNG heat insulated cylinder, the quantity of the market, the use of the status quo, analysis of the current periodical detection situation of on-board LNG adiabatic cylinders, put forward regular test methods, judging basis and validation requirements, etc. of the on-board LNG cylinders adiabatic insulation performance.

**Key words:** on-board LNG adiabatic cylinder; periodic detection; heat-insulating property

### 0 引言

综合比较目前常用的各种矿物燃料, 液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)具有能量密度大、运输方便、排放污染物少、安全性能好、经济效益显著等优点, 是一种清洁、高效能源<sup>[1-2]</sup>。随着节能环保的需要, 国内 LNG 使用量越来越大, 其中车载 LNG 气瓶的推广和使用是重型卡车、大型公交车等运输工具采用天然气代替汽油和柴油, 降低污染物排放

的一种有效手段。如使用车载 LNG 气瓶作为燃料来源的 LNG 汽车相比柴油汽车而言, LNG 汽车的氮氧化物排放仅为柴油车的 25%, 碳氢化物、碳氧化物排放仅为柴油车的 30% 和 12%<sup>[3]</sup>。近年来, 车载 LNG 气瓶行业在我国已经得到了迅猛发展。

车载 LNG 气瓶采用真空绝热技术实现 LNG 的长期贮存, 达到节能减排需求, 其低温绝热性能是衡量产品综合性能的重要依据之一。目前, 车载

收稿日期: 2015-12-18

作者简介: 丁栋(1982-), 男, 陕西兴平市人, 工程师, 从事航天产品泄漏检测和低温压力容器绝热性能检测工作。

Email: dingdong118@sina.com。

LNG气瓶的低温绝热性能在出厂前已经进行了严格检测,建立了相关检测方法标准和判别标准,但使用过程中的绝热性能检测一直是行业内的短板,相关标准和法规还不完善,存在使用安全隐患,特别是随着车载LNG气瓶市场保有量的增大和使用年限的增长,这种安全隐患也越来越明显。近年来,车载LNG气瓶的管理方、使用方和生产方对定期检测工作重视程度都越来越高。

## 1 车载LNG气瓶产业现状

国内车载LNG绝热气瓶行业经过近3年的迅猛发展,市场产能和保有量均有了大幅度的提高,在使用过程中产生的安全隐患也将越来越多,最早大批量投入使用的车载LNG绝热气瓶已进入安全事故频发期<sup>[4-6]</sup>。其原因在于,从结构原理上讲,车载LNG绝热气瓶是一种安装在重型卡车、城市公交车等运输工具上的特殊低温绝热气瓶,所采用的高真空绝热原理决定了车载LNG绝热气瓶随着使用时间的延长,绝热性能会下降,长期经历复杂路面的移动会加剧其绝热性能下降。绝热性能下降会导致车载LNG绝热气瓶外表面结霜、安全阀频繁起跳、燃料利用率低等问题,容易引起人员冻伤、可燃气体爆炸等安全事故,达不到使用LNG能源实现节能减排的要求。目前,国内车载LNG绝热气瓶的使用几乎遍布全国所有地区,安全隐患随时随地都存在,迫切需要使用者、监管者和政策制定方共同商议出有效可行的解决措施,消除安全隐患<sup>[7]</sup>。

## 2 车载LNG气瓶定期检测现状分析

在国内,车载LNG气瓶作为一种特殊的LNG焊接绝热气瓶,按照我国现行的定期检测管理要求,定期检测工作涉及气瓶、车辆、容器和真空绝热深冷设备等多个方面的要求,分析如下:

(1)气瓶管理方面要求。我国已经在气瓶的安全技术方面制定了标准<sup>[8-9]</sup>,但这些法规主要侧重于常温气瓶,对低温绝热气瓶也有所涉及,但要求不明确。在标准方面,已经制定了焊接绝热气瓶和钢质焊接气瓶定期检验与评定的标准,但尚无统一的有关车载焊接绝热气瓶国家标准,生产企业主要根据GB 24159-2009制定了企业标准进行生产,更缺少有关定期检测要求<sup>[10-11]</sup>;

(2)车辆管理方面要求。在法规方面,我国已经出台了车用气瓶安全技术监察规程<sup>[12]</sup>,但该法规主要适用于环境温度在-40~60℃使用的气瓶,对于温度小于-100℃的LNG气瓶尚无相关法规和标准要求,无法依据此法规直接进行车载LNG气瓶的

定期检测;

(3)容器管理方面要求。气瓶和容器均属于承压设备,按特种设备要求进行管理,其不同点在于容积不同,一般将容积小于1 000 L的承压设备称作气瓶,反之则称作容器,因此,与气瓶相关的法规和标准未规定的情况下,也可以参考容器要求执行。目前,我国已经出台了移动式压力容器安全技术监察规程、压力容器定期检验规则等法规<sup>[13-14]</sup>,对低温容器的定期检测已作了明确规定,但是气瓶和容器的容积相差较大,判别指标是否完全一致有待商榷;

(4)真空绝热深冷设备管理方面要求。真空绝热深冷设备性能试验方法(GB/T 18443)是我国唯一一部关于真空绝热深冷设备性能检测的专业标准<sup>[15]</sup>,但是该标准主要侧重于低温绝热压力容器、气瓶和管道的生产过程检验,无法完全满足真空绝热深冷设备使用过程中的定期检测,特别是车载LNG气瓶均安装在LNG汽车上,要求能够实现在线检测,基本上无法直接采用现有检测标准开展检测。

综上所述,车载LNG气瓶使用过程中的绝热性能检测一直是我国行业内的短板,相关标准和法规还不完善,存在使用安全隐患,部分地方检测机构,如广东、安徽等,也制定和出台了相关检测要求和标准,但所有现行有效的车载LNG绝热气瓶定期检测国家和地方标准更多的是侧重于常温性能和安全附件方面的检测要求,有关低温绝热性能要求方面的检测方法和判别依据规定很少,要求也差别较大。

在国外,由于管理体制与国内不同,无专门的政府监管机构,由行业协会代替政府进行车载LNG气瓶使用过程中的安全监管。如国际低温容器技术委员会(ISO/TC220)主要负责储存和运输冷冻液化气体的绝热容器领域有关产品的设计、制造和安全运行标准及气体物性、气体与材料的兼容性、绝热性能、安全附件和阀等支持性标准的制修订工作。针对车载LNG气瓶,ISO/TC220发布了低温容器-体积不大于1 000 L的移动式真空绝热压力容器第1部分:设计、制造、检验与试验和体积不大于1 000 L的移动式真空绝热压力容器第2部分:运行要求<sup>[16-17]</sup>。此外,欧盟和美国也有相应的标准和规范<sup>[18]</sup>。

## 3 车载LNG气瓶绝热性能定期检测方法分析

### 3.1 现有检测方法分析

#### 3.1.1 静态蒸发率

静态蒸发率是综合反映车载LNG气瓶绝热性能的关键指标,GB/T 18443中规定了称重法和流量

计法两种方法。其中称重法的测量原理是:利用称重传感器,通过测量给定时间段内的被测容器内充装的低温液体损失量实现蒸发率测量。对于绝热性能合格的车载 LNG 气瓶其充装介质蒸发损失量一般为 1~5 kg/d,而定期检测过程中车载 LNG 气瓶均固定安装在重型卡车或公交车上,不易拆卸,整车的装备质量一般在  $10^4$  kg 量级,采用称重法进行测量时要求称重传感器的精度在  $0.001\%F \cdot S$  量级,市场上缺少这种高精度的称重传感器,因此称重法不适用于定期检测过程中的车载 LNG 气瓶静态蒸发率测试。

流量计法的测量原理是:利用流量计作为主要测量仪器,通过测量给定时间段内,被测产品内容器中,由于外部热量漏入而导致低温液体气化产生的气体量。实际测试过程中,由于温度、压力、振动等环境条件的影响,导致流量计给出的瞬时流量变化较大,需要充分考虑温度平衡、压力平衡、环境大气压波动等影响因素,标准要求测量时间不少于 48 h,对于商业运行的重型卡车和公交车将带来较大的经济损失。

车载 LNG 气瓶存放过程中,利用由于内外容器间的漏热使绝热气瓶内压力升高、液位下降原理的自然升压法、液位计法也可以实现 LNG 气瓶的绝热性能监测,但是这两种方法的测量不确定度较大,无法满足车载 LNG 气瓶定期检测过程中的绝热性能评定,仅适用于用户使用过程中对产品绝热性能的定性判断。

### 3.1.2 夹层真空度

车载 LNG 气瓶采用高真空多层绝热方式实现高效绝热,影响绝热性能的主要因素有夹层真空度、颈管传热、绝热多层表观导热等。其中夹层真空度随着产品的使用时间延长,总是会缓慢上升,从而导致绝热性能下降,而颈管和绝热多层主要受制造工艺确定,使用过程中绝热性能降低的可能性较小,因此可以用夹层真空度指标间接反映车载 LNG 气瓶的绝热性能。

GB/T 18443 中规定了直接法和间接法两种夹层真空度的测量方法。其中直接法是利用绝热设备自带的真空规实现夹层真空度测量,但是国内生产的车载 LNG 气瓶一般不安装真空规,因此直接法不适用于车载 LNG 气瓶定期检测过程中夹层真空度的检测。间接法是利用辅助抽空设备、真空规,将测量管道与车载 LNG 气瓶的抽空口相连,在确保真空测量条件满足一定要求后,打开车载 LNG 气瓶

的抽空阀门,实现被测空间与测量仪器空间的连通,达到夹层真空度测量目的。间接测量法需要较复杂的测试设备,打开抽空阀门的过程中容易产生泄漏,造成测量误差,严重时甚至会损坏被测产品。

### 3.1.3 漏率

车载 LNG 气瓶漏率包括内外容器漏率之和,在对内外容器进行检漏之前,应先对内外容器表面进行清洁处理和烘烤除气。检漏时将氦质谱检漏仪与车载 LNG 气瓶的抽空阀门连通,利用喷氦法和氦罩法相结合,对每一道焊缝进行检漏。喷氦法的测量原理是当氦质谱检漏仪处于检漏工作状态时,用喷枪在被检容器可疑漏气部位喷吹氦气,如果有漏,氦气通过漏孔进入被检容器内部并进入到检漏仪,由显示屏指示出来<sup>[9]</sup>。喷吹法的最大优点在于可以准确找到漏孔位置。氦罩法的测量原理是用氦罩将被检容器可疑处全部罩起来,氦罩内充一定浓度的氦气,也就相当于使用无数个喷嘴在无数个可疑部位同时喷吹氦气,这无疑将大大加快检漏速度。

### 3.2 检测流程分析

通过分析静态蒸发率、夹层真空度以及漏率的现有检测方法可以看出,在车载 LNG 气瓶绝热性能定期检测过程中,开展静态蒸发率测试需要较长的周期,开展夹层真空度和漏率测试需要复杂的设备,行业内尚没有较好的解决措施和统一的检测流程。综合分析车载 LNG 气瓶结构原理、现有检测方法和经济成本,提出车载 LNG 气瓶绝热性能检测流程如图 1 所示,依据有以下几个方面:

(1)静态蒸发率反映的是车载 LNG 气瓶的综合绝热性能,如果合格,产品就可以继续使用;

(2)静态蒸发率不合格的原因之一是产品内部结构存在问题,只能由专业的生产厂家才能解决,代价较高,需要停止使用,采取报废或返厂维修措施;

(3)夹层真空度是影响静态蒸发率不合格的主要原因,车载 LNG 气瓶随着使用时间的延长最容易导致夹层真空度不合格;

(4)车载 LNG 气瓶的内容器在出厂前经过了严格的检漏,一般不会有泄漏发生,但外容器在使用过程中容易受到碰撞、冲击、振动等外力作用,存在泄漏隐患,一旦发现夹层真空度下降,有必要对气瓶进行氦质谱检漏;

(5)车载 LNG 气瓶真空夹层中填充了低温吸附剂,吸附剂失效后容易导致 LNG 介质充装后低温夹层真空度不合格;

(6)由于使用过程中的材料放气、检测误操作

等导致的真空失效,可以采取重新抽空的方式实现

真空获得和维持,且维修周期和成本较低,易实现。

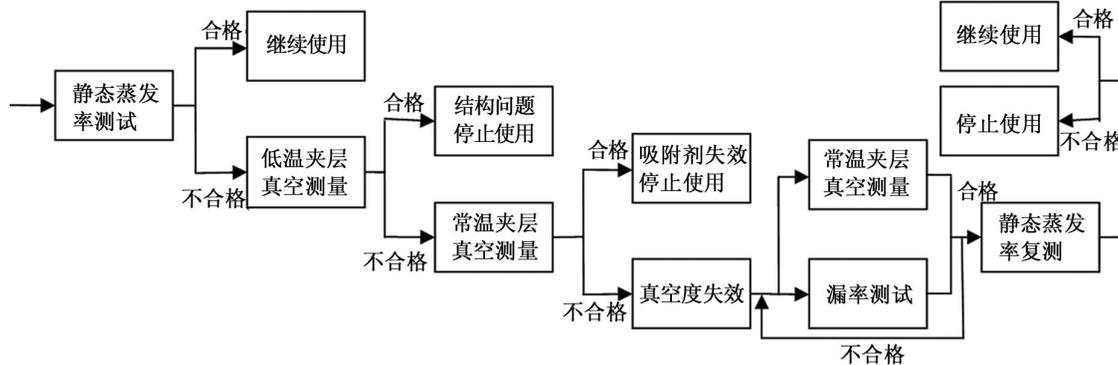


图1 车载LNG气瓶绝热性能检测流程图

### 3.3 检测方法分析

#### 3.3.1 静态蒸发率

静态蒸发率测试基本原理依据 GB/T 18443 中规定的流量计法,但是为了提高检测效率,降低检测成本,拟采取四个方面的改进措施。

(1)建立批量化、自动化检测线,以实现大规模检测,分摊检测成本;

(2)研制小型便携式检测设备或移动式检测车,实现上门检测,以满足大客户检测需求;

(3)增加压力泄放装置,实现车载LNG气瓶内容器压力的快速泄放,缩短压力平衡时间,提高检测效率;

(4)增加流量计出口压力调节装置,降低测量过程中环境大气压力变化对测量结果的影响,缩短累积测量时间,提高检测效率。

#### 3.3.2 夹层真空度

夹层真空度测试的基本原理依据 GB/T 18443 中规定的间接法,为了提高检测效率,简化操作流程、降低检测误操作的风险,拟采取三个方面的改进措施。

(1)研制集抽空、测量和数据处理一体化的专业化、自动化检测设备,实现非专业人员经过简单培训就可操作,缩短检测人员培训周期的同时,确保检测结果的准确性;

(2)针对夹层真空度仅是间接影响绝热性能,及定期检测精度要求相对较低的实际需求,在保证检测结果准确的前提下,降低抽空系统极限压力、仪器测量精度、测量管道本底漏放气速率等辅助测量条件的要求,减小测量设备成本,缩短测量时间;

(3)开展夹层真空度与介质温度变化关系研究,为夹层真空度测量结果修正提供解决方法和试验数据。

#### 3.3.3 漏率

漏率测试的基本原理依据 GB/T 18443 中规定的无分流检测法和分流检测法开展。在开展漏率检测时,应先将气瓶内胆恢复到常温,夹层压力抽至低真空状态,以便将干扰因素降低,防止数据失真。

#### 3.4 判别指标确定

目前,国内尚无有关车载LNG气瓶绝热性能定期检测的判别依据,但在国家质量监督检验检疫总局给出了固定式真空绝热压力容器定期检测过程中的夹层真空度和静态蒸发率判别指标,在 TSGR 7001-2013 的附录 A 中给出了汽车罐车和罐式集装箱的真空绝热罐体等移动式真空绝热压力容器在定期检测过程中的夹层真空度判别指标,如表 1 所列<sup>[14]</sup>。在固定式真空绝热深冷压力容器、低温液体罐式集装箱和低温液体汽车罐车中,给出了漏率判别指标,定期检测漏率判别指标可参照执行<sup>[20-22]</sup>,如表 2 所列。

表1 移动式真空绝热压力容器夹层真空度定期检测判别指标

绝热方式	夹层真空度/Pa	结论
真空多层	$\leq 1.33$	继续使用
	$> 1.33$	重抽真空
真空粉末	$\leq 13.3$	继续使用
	$> 13.3$	重抽真空

依据车载LNG气瓶的绝热方式、实际使用状态以及容积等条件,初步给出的车载LNG气瓶夹层真空度及静态蒸发率定期检测判别指标如表3所列,有六个方面的确定原则:

(1)车载LNG气瓶普遍采用高真空多层绝热,需要依据表1和表2中的真空多层绝热方式制定判别指标;

(2)车载LNG气瓶安装在重卡和公交车等移动

工具上,应参考移动式压力容器制定判别指标;

(3) 车载 LNG 气瓶的容积明显小于各种压力容器,依据真空绝热深冷设备容积越小真空度要求越高的原则制定判别指标;

(4) 依据多年的真空绝热深冷设备夹层真空度检测经验,填充低温介质后真空绝热深冷设备的夹层真空度一般会降低 1~2 个数量级;

(5) 车载 LNG 气瓶用于贮存 LNG 介质,其温度明显高于贮存 LOX、LN<sub>2</sub>、LAr 介质的绝热气瓶,装有介质后的夹层真空度指标应该松一些;

(6) 车载 LNG 气瓶的静态蒸发率指标在 2%/d 左右,相对于真空绝热压力容器指标在 0.2%/d 左右明显偏高,TSG R7001-2013 中规定为两倍的额定蒸发率判别指标较松,应该更严格一些。

表 2 固定式真空绝热压力容器夹层真空度及日蒸发率定期检测判别指标

绝热方式	真空度		漏率		日蒸发率
	测量状态	数值/Pa	几何容积/m <sup>3</sup>	数值/(Pa·m <sup>3</sup> /s)	
粉末绝热	未装介质	≤65	1≤V≤10	≤6×10 <sup>-7</sup>	实测日蒸发率数值小于 两倍额定日蒸发率指标
	装有介质	≤10	10<V≤100	≤2×10 <sup>-6</sup>	
多层绝热	未装介质	≤20	1≤V≤10	≤2×10 <sup>-7</sup>	
	装有介质	≤0.2	10<V≤100	≤6×10 <sup>-7</sup>	
			100<V≤500	≤2×10 <sup>-6</sup>	

表 3 车载 LNG 气瓶夹层真空度及静态蒸发率定期检测判别指标

真空度/Pa		静态蒸发率测量	结论
测量状态	数值		
未装介质	≤1.3	实测静态蒸发率数值小 于 1.5 倍额定蒸发率指标	继续使用
	> 1.3		重抽真空
装有介质	≤0.1		继续使用
	> 0.1		重抽真空

#### 4 定期检测方法验证和推广工作

车载 LNG 气瓶绝热性能定期检测一直是特种设备监管行业的一个盲区,近年来随着车载 LNG 气瓶市场保有量的急剧增加,越来越引起监管部门和使用者的关注,社会媒体也曾报道有关使用者投诉车载 LNG 气瓶无法开展定期检测的新闻事件。国家低温容器质量监督检验中心作为一个长期从事真空绝热深冷设备绝热性能检测的国家级检测机构,是我国真空绝热深冷设备行业部分国家标准的制定单位之一,近年来,正积极利用自身技术优势,已经与甘肃、山东、内蒙等部分检测机构合作开展车载 LNG 气瓶绝热性能定期检测方法研究、制定和验证工作,但由于我国尚缺少统一的检测标准,尚未实现普遍推广和应用,初步拟定的定期检测方法和判别依据的正确性和合理性尚有待广泛的工程实践去检验。

#### 参考文献:

[1] 吴佩英. LNG 汽车加气站技术的发展与应用[J]. 煤气与热力, 2003, 23(3): 629-630.

- [2] 何太碧, 黄海波, 林秀兰, 等. 中国 LNG 汽车及加气站技术应用分析及推广建议[J]. 天然气工业, 2010, 30(9): 82-86.
- [3] 景团朋, 夏鸿文. 我国 LNG 汽车发展现状及前景分析[J]. 交通节能与环保, 2014(2): 24-27.
- [4] 陈联, 郭超, 朱建炳, 等. 我国 LNG 储运设备发展现状[C]// 第十一届全国低温工程大会, 2013: 199-203.
- [5] 杨丹. 2013 天然气车用年[J]. 汽车与配件, 2013(30): 11-13.
- [6] 张立超, 刘怡君. 低碳交通视角下的 LNG 汽车产业现状与前景预测[J]. 中国软科学, 2014(5): 64-74.
- [7] 冯陈明, 段兆芳, 单卫国. LNG 汽车发展现状及相关问题分析[J]. 中国能源, 2014, 36(2): 32-35.
- [8] 杨鹏, 张新建, 柳文平, 等. TSG R0006-2014. 气瓶安全技术监察规程[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2006.
- [9] 罗晓明, 杜顺学, 董尚元, 等. 国家质量监督检验检疫总局. TSG-RF001-2009. 气瓶附件安全技术监察规程[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2009.
- [10] 王竞雄, 叶青, 裘维平, 等. GB 24159-2009. 焊接绝热气瓶[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(下转第 172 页)

描谱图如图5所示。

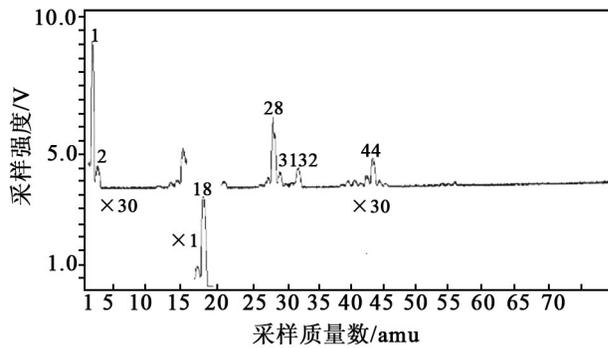


图4 O形氟橡胶圈密封进样系统的谱图

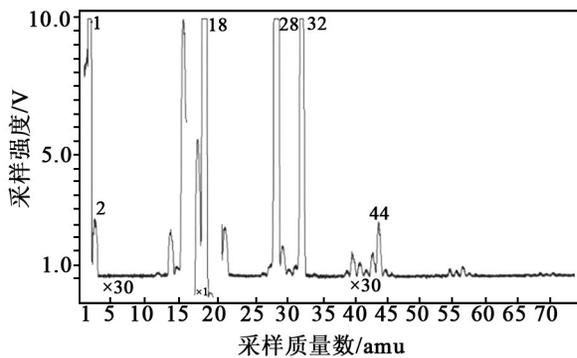


图5 O形氟橡胶圈放入样品室的扫描谱图

系统谱图5中的主要成分有:1、18、28和32峰,且其峰高值都相对较大,产生削顶现象。2、14、16、17、44峰及其附近的峰、55峰和其附近的峰及70峰附近的峰都有出现。图5和图4比较,可以发现O形

氟橡胶圈放在样品室时,放出了大量的杂质气体,如果样品室有需要分析的痕量杂质的话,很明显会对其分析产生大量干扰气体。

### 3 结束语

通过对实验结果分析,发现在使用O形橡胶圈密封进样系统时,虽然只有很小表面暴露在真空环境中,但对于痕量气体分析来说,其所释放的气体不能实现对PPM量级的杂质检测。因此,在痕量杂质分析时,要尽量使用金属或其他放气较小的密封件。

### 参考文献:

- [1] 陈志平,李频,蒋家羚.大规格O形橡胶密封圈在特殊管道中的应用研究[C]//第三届全国管道技术学术会议压力管道技术研究进展精选集,2006:134-137.
- [2] 蒋伟华.基于O形橡胶圈密封的高压容器设计和研究[D].杭州:浙江大学,2006:6-11.
- [3] Shao X, Zhang J, Tan B. A study on the test of influence of compression rate to leakage rate of O-ring in space station[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Test and Measurement Shenzhe, 2003: 2743-2746.
- [4] 董猛,冯炎,成永军,等.材料在真空环境下放气的测试技术研究[J].真空与低温,2014,20(1):46-51.
- [5] 毛福明. GS-250型痕量气体分析质谱计[J].质谱学报,1995,16(1):24-28.

(上接第161页)

- [11] 郑宁,胡毛良,黄霞志,等. GB 13075-1999. 钢质焊接气瓶定期检验与评定[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [12] 廖洋,刘守正,王志,等. TSG R0009-2009. 车用气瓶安全技术监察规程[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2009.
- [13] 寿比南,周伟明,王晓雷,等. TSG R0005-2011. 移动式压力容器安全技术监察规程[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2011.
- [14] 林树青,李邦宪,王晓雷,等. TSG R7001-2013. 压力容器定期检验规则[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2013.
- [15] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T 18443-2010. 真空绝热深冷设备性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [16] ISO/TC220. ISO21029-1:2004. 低温容器-体积不大于1 000 L的移动式真空绝热压力容器第1部分:设计、制

造、检验和试验[S]. 国际标准化组织(ISO),2004.

- [17] ISO/TC220. ISO21029-2:2004. 体积不大于1 000 L的移动式真空绝热压力容器第2部分:运行要求[S]. 国际标准化组织(ISO),2004.
- [18] 周伟明,陈朝晖,魏蔚. 深冷真空绝热容器标准技术发展与展望[J]. 压力容器,2013,30(2):3-4.
- [19] 黄宏,王丽红,陈联,等. 低温绝热压力容器检漏系统分析[J]. 真空与低温,2009,15(3):160-164.
- [20] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T 18442-2011. 真空绝热深冷设备性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [21] 全国锅炉压力容器标委会. JB/T 4784-2007. 低温液体罐式集装箱[S]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [22] 全国锅炉压力容器标委会. JB/T 4783-2007. 低温液体汽车罐车[S]. 北京:机械工业出版社,2007.