

工业性氮质谱检漏试验

鲍士儒 刘志东 译

1. 引言

最初的氮质谱检漏仪的专利大约始于 40 年前,那时,还没有能够达到所需要的灵敏度的技术。人们一直认为检测很微小的漏孔是氮检漏的主要用途。浸水检验,卤素检漏仪和着色渗透仍然是工业上的传统方法。这时,大部分待检的漏孔为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 毫巴·升/秒。近 10 年来,采用更可靠、更便宜的电子元件的真空技术的发展,已允许氮检漏仪在工业应用中成功地进行竞争。为了表明这是一场多么重要的挑战,本文介绍氮检漏仪的四种截然不同的检漏应用。在这些应用中,它已经或似乎有希望成为常规的检验方法。

2. 汽车检漏试验

具有一定的竞争价格的高性能汽车的技术要求已迫使汽车制造厂家仔细考虑生产过程的每个环节。传统的检查车体和车门的密封漏孔的方法是在整个汽车上喷洒大量水,然后目检,看水是否流进了车体内部。这个方法有很多缺点:(1)取决于操作者的努力程度;(2)水浸入损害汽车内部;(3)漏检或很难找到漏孔;(4)补漏引起的其它问题。奥斯丁罗威尔小组和英国的雷勒工业技术组织应用现代组装技术将这种传统程序排列成行,试验了许多替换方法。其中包括:热象法、射流技术、超声、探索气体检测。探索气体检测最有希望,但会受环境中氮探索气体量多的干扰。

这个问题可使用一个灵敏的探头来解决,洁净气环或屏蔽密封着探头的吸嘴。把混有少量氮的空气注入汽车。探头从潜在漏孔周围抽出空气,

并在粘滞流状态下将其传给监视氮含量的质谱检漏仪。把输出信号送入计算机进行分析。由于车辆的泄漏,汽车周围的空气可能具有高的和不同的氮浓度,但正如图 1 所示,空气的低压屏障阻止了汽车周围的空气进入取样管。因此,除来自汽车的任何其它泄漏之外,进入检漏仪的气体还含有 0.00047% 的环境氮量。从中要减去环境本底。必须在离物体小于 25 毫米的距离使探头吸嘴经过所有可能有漏孔的地方,另外必须保持移动速度不变。这些要求只是意味着整个工艺过程必须自动化。探头必须在机械手控制下移动。

应把检漏试验装置设计在现有的传动装配线上,装配线在机械手操作管理的工作位之间。至此,机械手几乎总是在它们面前的每次工件停留的同一位置上工作。由机械手判断工件位置和估计工件位置的偏差是很困难的也是极不经济的。为了克服这个困难,必须把每个车

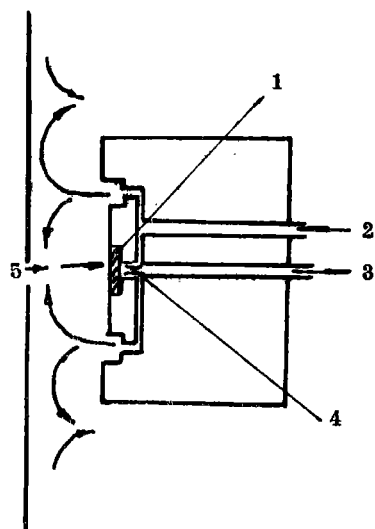


图 1 有空气屏蔽效应的检漏探头

1. 过滤器; 2. 清洁空气;
3. 到检漏仪; 4. 节流器; 5. 漏孔

身放在设计误差仅 ± 5 毫米的传动线路的适当位置上,其实,实际误差已达到 ± 1.5 毫米。车体沿着轨道移动时,支撑车体的底座已被精确设计的夹具所代替,这些夹具自动地把每个车体固定在适当的位置上。然后机械手就能够以一种均匀的速度和距车体同等的距离围绕着正在移动的车体操纵检测器进行检漏。

检漏仪须在不到1秒的响应时间内检测约为百万分之二的气浓度的变化。主要真空部件及质谱仪距离探头入口处为6米。为了使响应时间缩短到最低限度,在粘滞流状态下以大约5个大气压·厘米³/秒的速率把气体吸入检漏仪。让一定比例的气体通过碳化硅漏孔进入装有质谱仪的高真空区域。当判定每个漏孔的位置时,都要通过计算机把经过入口管道的约为1秒钟的气体输送滞后时间计算进去。

经过油漆、装璜并安装好所有玻璃及密封垫的车身都要暂时把所有通气孔堵住。当车身向检漏试验区移动时,操作者要根据计算机的光电输入记号验证车辆。把低浓度氮的空气源接到汽车上,通常通过齿轮换挡器的孔隙连入。在压缩空气经过的喷射管中发生气体的混合。

汽车轻微地加压2秒钟,然后允许在汽车里稳定一个短时间。由于试验是用检测气体向外漏的方法来代替向内漏水,为了防止错误的结果,内压稍高于环境压强。该技术已全面试验过,并已测出氮检漏和水漏试验间的一致性。

车辆两侧各有一个机械手,最初在正面围屏区域移动,然后在装侧镜的校准点上检测氮的浓度。这里,低的读数可能意味着车体上有大漏孔,正如一扇敞开的窗口一样,不可能达到所需要的内压。假定在校准点得到一个满意的信号,那么机械手就会沿着车体的有关部分以300毫米/秒的速度导引探头。移动时,由计算机分析来自检漏仪的信号作为任何漏孔位置和大小方面的400个分立信息部分。来自检漏仪信号的大小与机械手的移动速度有关,所以必须校正以达到标准。该系统能详细打印显示出需要修整漏孔的位置。为诸如车门的上端部位漏孔编排计算机程序给出的有效位数,要比在更为关键的诸如屏风玻璃密封的漏孔给出的有效位数少。这种方法非常灵敏,即便是不渗水的漏孔也能检出。

计算机控制系统的一个很大优点是,能够测定一些很可能要超越出允许范围的测量结果,以使工程技术人员在出现任何废品之前就能够纠正潜在的生产问题。这种技术不仅能节省资金,而且也可以并继续在所允许的设计改进方面提供有价值的资料。

3. 核燃料棒试验

作为英国核燃料有限公司镁合金燃料棒生产改革方案的一部分,已决定把质谱检漏系统并入生产线。这种端部焊有一个帽的长1100毫米圆柱体的燃料棒由铀制成,外壳为镁合金。工作时会产生放射性气体,必须密封在燃料棒中,以防止污染反应堆。研制这种系统的主要设计标准是比原有方法使操作者更不容易出差错,维修又方便。随着对于进行这种操作而使用的处理和分析资料的需要,这些要求意味着该系统必须受计算机控制。由质谱检漏仪、容器抽气设备、计算机控制装置组成的这种系统如图2所示。试验以12根为一批并有测出大于 3×10^{-8} 毫巴·升/秒漏孔的能力。在300毫巴下将浓度为8%的氮气预先注入燃料棒。

两个装有燃料棒的 $660 \times 150 \times 1200$ 毫米的试验容器的总容积为240升。通过两个隔离阀将其与抽速为300升/秒的带冷障板的扩散泵相联结。用10升/秒的机械泵获得容器的预真空,容器抽空期间用4升/秒的机械泵作为扩散泵的前级。微漏试验时断开前级泵,前级压强由检漏仪维持。显然,这时所有的试验气体都进入以最高的灵敏度工作的检漏仪中。一个

小型节流阀把检漏仪与容器联结在一起,并允许容器气体样品在降低灵敏度的情况下进行分析。因此,在试验初期就能检测出大漏孔。

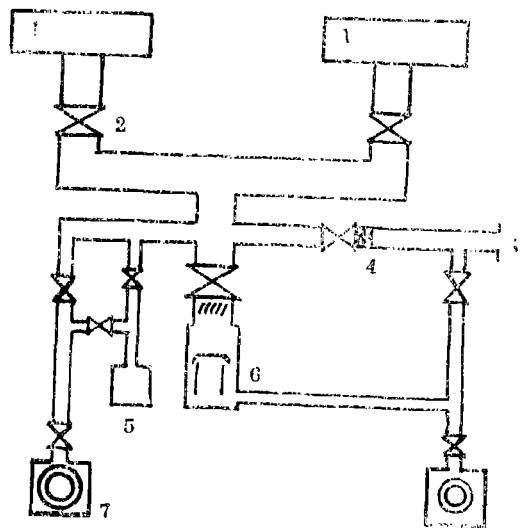


图2 核燃料棒容器的真空系统

1. 容器; 2. 气阀; 3. 接氮检漏仪; 4. 节流阀;
5. 氮漏孔; 6. 带液氮冷却障板的扩散泵; 7. 机械泵

的数目、微小漏孔和大小漏孔检验的失败率以及日期。该程序使用 18 K 存储器。

被替代的系统都是手控操作的。检漏仪连接到扩散泵上方,通向大型液氮冷阱的真空系统上。容器抽到足够低的压强以后,断开扩散泵并打开检漏仪的隔离阀。由于试验容器的容积大,容器与检漏仪之间的连接管道的通导小,致使检漏仪对从燃料棒漏出的氮气的响应时间达到好几分钟。若增加连接管道的通导,会导致检漏仪中压强的大大增加,这主要是由于容器中的水蒸汽引起的。

就新系统来说,在检漏期间,扩散泵继续抽空试验容器,以便借助容器处较高的抽速,较容易地就达到几秒的响应时间,用检漏仪迅速排除来自扩散泵前级的气体,高真空系统中的低温障板有很高的俘获效率,加上检漏仪的液氮冷阱,几乎阻止了所有流向质谱仪的水蒸汽。非冷凝气体量是非常小的,由检漏仪迅速抽除。

新系统的操作方法是:先把容器抽到 10^{-4} 毫巴量级,然后打开检漏仪的隔离阀。由于该系统的快速响应,所以能快速地依次启闭容器的隔离阀,来确定不合格的燃料棒可能在哪个容器中,与旧系统漫长的缓慢上升的特性相比较,新系统中控制容器隔离阀的这种快速响应给出了在检漏指示中氦气量的变化的更大置信度。这个系统已令人满意地运转了一年多的时间。

4. 致冷工业的检漏试验

逐渐使用氦质谱检漏仪的另一领域是致冷工业。浸水试验用于蒸发器和冷凝器这类部件为时已久,这是不精确的,部件检漏后还须烘干。组装好的致冷机已用卤素检漏仪进行检漏试验,但易受喷漆,以至香烟烟雾的干扰。在大漏时还容易达到饱和。生产厂家一直想找到替代的方法,不少厂家已选用了氦质谱检漏仪。

改进检漏仪,使其与一台使用 Motorola 6809 型 8 位微处理机的计算机相联结。许多包括电流开/关、检漏试验开始/完成、灯丝开/关在内的操作都既能用手动,也能用计算机操纵。灯丝发射情况及质谱仪压强值都送入计算机,以确保该系统工作可靠,即使发射值不正确也不可能给出错误的读数。检漏仪和真空机组中冷阱的液氮液面都连续地受到监控,一旦需要就自动补充液氮。除操纵检漏仪而外,计算机还能全面控制真空机组中的气动阀和真空泵。即使用手动操作时,整个系统也是可靠的,还有故障判断程序编入程序之中。检测数值、真空度、空气压强、水流量以及容器入口位置的显示的监控程序被放入控制系统中。

用装在真空系统内的一个氦石英标准漏孔来实现自动校准。只要需要,就能随时获得打印出的试验数据。可获得的资料还包括试验组件

特别是必须检出每年漏几克制冷剂的漏孔。一个部件一般要求在 30 秒左右的时间 内 检 出 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ 毫巴·升/秒的漏率。主要问题是制冷机中的细长管道引起的,当过压 试 验 给 组件增压和为真空试验进行抽气时,对气流形成很大的阻力。

蒸发器由管道组成,一般是长为 10 米,内径为 5 毫米,一端与几米长的毛细管 相 连。目前所用的检验这种组件的最好办法是真空的方法。当压强高于几毫巴,粘滞流占优势时,须把探索气体引入检漏仪。以这个原则为基础的两个方法已成功用于检验蒸发器,它们都是把蒸发器的内径为 5 毫米的管道与检漏仪相联结。第一个方法是封住毛细管的末端。把部件放入一个氦气盒中,并用检漏仪抽气。蒸发器被抽空时,氦可以通过任一漏孔吸入,并迅速进入检漏仪。

这个方法是简单的,但必须在部件内部形成分子流之前立即施放试验气体进行检验。另一个方法不封住毛细管的末端,而是用一个节流阀把它连到清洁的空气源上。这样就可以长时间保持粘滞流状态,在有空闲的时候再检验每条焊缝。夹紧焊缝四周的专用工具确保所有潜在的漏孔被氦气所笼罩。

制冷机装配工艺的改革意味着对已装有泡沫绝热材料的壳体内部的部件进行最后的铜焊操作。使用卤素检漏仪时,这类绝缘材料会严重地影响卤化物。氦检漏提供了解决这个问题的两种不同的方法,因各有所长,所以都已纳入生产线中。

第一种方法是过压检验,即在几巴的压强下使氦气注入已装配好的制冷机。为了避免来自充氦区的氦气影响检漏试验的可能性,还要给出氦气渗透到所有潜在泄漏焊缝的时间,充氦操作要尽可能远离生产线。用与普通检漏仪相连的取样管作检漏试验。取样管在粘滞流状态下工作,从漏孔周围吸入约 1 大气压·厘米³/秒的气量。只有少量气体从漏孔进入高真空区进行分析。这种探头在它和漏孔的距离比真空取样器大得多的情况下检测漏孔,而真空取样器内的流量是很小的,在分子流状态下进行输送。尽管这个方法可以很容易检出 10^{-5} 毫巴·升/秒的漏孔,但须取决于操作者的水平,而操作者又不得不使探头端部靠近每一个潜在的漏孔。

另一种对操作者的技能和操心要求较低,只需在潜在漏孔附近喷氦的方法是真空检漏试验,因此,就不一定需要熟练的操作者了。已将这种方法纳入生产线中,在生产线上以每 45 秒一台的速度组装制冷机。每条生产线上都有一台检漏仪。在耐压试验阶段,大漏孔都能在早期发现。然后依据制冷机的大小用机械泵抽 3 ~ 5 分钟。这个步骤在装添制冷剂前是完全必要的。装添前,要把制冷机与泵隔开,并在尚未送进空气前把制冷机与检漏仪接上。接好以后开始检漏试验 20 秒。由于最后装配形成的所有的接缝都离压机不远,所以只要检漏仪与压机两侧的两根软管相连,那么到达探索气体的响应时间通常为 3 秒。这种方法已证明是很可靠的。然而由于生产厂家进行氦检漏试验所发生过的压机内氦的存贮效应,使氦检漏不断地出现了问题。

5. 全自动检漏

随着对高质量产品的需求以及工资的增加,全自动检漏系统的投资是合算的。现已把检漏仪纳入装配线中,部件的筛选也是自动的。

自动检漏仪原理如图 3、图 4 所示。把试验位置与含一定比率氦的氦气源相连。使用的氦浓度取决于所要求的漏率及工作时间。因为,通常由粘滞流来表示漏孔特征。在试验条件下,漏率随内部压强的平方的增加而增加。氦的成本取决于浓度和它的压强之积。因此,有

助于在试验件内部处于最高的、切实可行的压强和最低的氦浓度下进行检漏。一般达到30巴的压强时，氦浓度将是10%，在试验中利用仔细设计的连接器把试验气体通到试验产品上。显然，连接器的漏率必须大大地小于试验件所允许的漏率。在软管传送氦气的时候，使用带有套筒的连接器来达到这个标准。对套筒加压时，套筒就把软管强压在试验件的连接器上，从而获得可靠的密封。

试验件由一个容器密封起来，将该容器连接到一套含有一台机械泵和一台常用的机械增压泵的抽气系统上。抽空容器所要求的泵的大小由一套很好实践过的计算程序来计算。容器

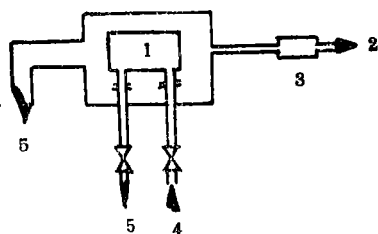


图3 工业性自动检漏的原理

1. 试验组件；2. 质谱仪；
3. 节流阀；4. 加压机；5. 真空泵

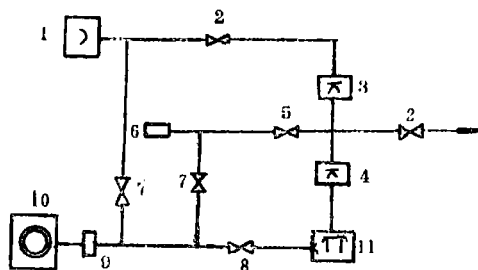


图4 工业性自动检漏仪中的高真空系统

1. 质谱仪探头；2. 隔离阀；3. 低温障板；
4. 水冷障板；5. 漏孔隔离阀；6. 石英标准漏孔；
7. 粗抽阀；8. 前级阀；9. 过滤器；10. 机械泵；
11. 扩散泵

通过节流阀与高真空系统（示于图4）相连，用于调节处于打开位置阀门的通导率来提供系统所需的灵敏度。高真空系统带有一台连接到63毫米扩散系统上的扇形磁偏转质谱仪。由本身带有冷冻系统冷却的障板在-40℃温度下工作并防止来自样品的会降低质谱仪性能的碳氢化合物的污染。更换灯丝可把质谱仪与扩散泵隔开。

用图5所示的时间表示说明典型检漏试验程序（图5略）。如果试验件有很长的细管，那么抽空这一步骤是必要的，因为空气被压缩在细管中，因此妨碍氦气及时到达漏孔。通常，把试验元件抽到1毫巴左右。然后把氦——空气混合气体以一受控的速率充入试验件。如果在规定时间内还没有达到所要求的压强，那就表示有大漏孔，立即停止检验。假定最终阶段是令人满意的，把试验件充到额定压强之后就开始检漏。随后把氦气排出，最后在拆去加压机时，为了避免容器的污染，把容器内的试验混合气体抽出。

一旦装上检验件并把它连到试验气体管道，就要抽空容器。达到检验时间所需的抽气系统，通常由机械泵和机械增压泵组成。小检验件可不用机械增压泵。一旦达到检验压强便降低小阀门的通导来维持压强。同时打开组装在其中的手动可调节流阀，让包括质谱仪在内的高真空系统来从试验容器中抽取大气样品。将漏孔的大小同所要求的漏率值相对照来看试件是否合格。每检一次都要例行一次校准程序，校准过程中，把从标准漏孔的已知氦量通入质谱仪。

该系统的控制是通过微处理机进行的，除了程序操作过程的需要而外，还监控下列项目：（1）空气源；（2）氦气源压强；（3）水流量；（4）阀门启闭；（5）校准的检验；（6）质谱仪压强；（7）扩散泵温度；（8）高真空系统低温障板温度。

（下转45页）

(2) 空调

座舱内的空气必须保持供人呼吸的良好状态。为此必须检查和调节空气中的有毒气体比率、温度、氧含量、尘埃以及解决由于失重而处于悬浮状态的微粒子的过滤等问题。

(3) 特殊装置

为饮食和其它一切生理需要而专门设置的装置。

(4) 保护

为防止紫外线、电子、质子和所有其它粒子的辐射和陨石的击伤而采取的防护措施。

(5) 需要具有上述防护功能的特殊的太空服,以便使宇航员在舱外能够工作、观测和活动。

8. 结束语

本文所讨论的问题与实际真空有直接或间接的关系,这些问题是空间研究和航天器发展方面必须解决的问题中的一小部分。在探空火箭发射之前,人们进行了大量的研究工作,此外,还用特殊的真空试验、设备检验了所有计算结果。这些设备将由其它文章加以介绍。

(译自 Proc. 9th Intern. Vac. Cong. (1983) 258,
原文作者 H. Curien 等人, 陈隆智 郭晓玲校)

(上接50页)

这些职能的每一种工作情况,都是由控制板上的指示灯来显示的。另外还备有一种所有的输入和输出信号的显示器,倘若故障出现它能够进行快速故障判断。计算器自动显示出通过检漏试验的产品件数,大漏故障次数及微漏次数。在这样复杂的系统中,可靠性是极端重要的。大约几个月内就能轻而易举地完成一百万个阀门的检验工作。尽管这样大的需要量,该系统仍能照常运转达到预定时间的 95% 以上。

6. 结论

介绍的四种工业应用表明了氮质谱检漏技术日益增长的重要性。它曾认为极其复杂,不可靠且使用费用昂贵,而现在已得到充分肯定。10 年来所发生的这种变化的原因在于工资不断增加,更为可靠和经济的真空设备,以及日趋强大的电子仪器设备。如果需要,可把系统设计为全自动的,还可照常编入故障判断程序。由于带有完全一致效果的重复性工作变得越来越难于找到承包镗削加工的工人,所以自动氮检漏仪肯定会在连续生产高性能产品的广阔领域中继续发挥重要的作用。

(译自 Proc. 9th Intern. Vac. Cong. (1983) 227,
原文作者 A. E. Holme, 邵惠民 荣耀明校)