

# 传统气泡捡漏法的特点以及其他 气体泄漏测试的新技术

## Characteristics of Traditional Bubble Leak Detection Method and Other New Technologies for Gas Leakage Testing

摘要：针对传统的气泡法检漏技术，本文详细介绍了气泡法的基本原理、气泡法中的两种标准方法——加压法和真空法以及对应的标准规范，并对这两种气泡法进行了对比分析。本文还对气泡法的技术特点进行了分析，指出了气泡法检漏技术的局限性，由此引出和介绍了更先进的自动化高精度的检漏测试技术——压力衰减法。

### 1. 气泡泄漏检测方法概述

气泡泄漏检测 (bubble leak test) 一般简称为气泡排放检测 (bubble emission test)、浸没泄漏检测 (submersion leak test)、水下浸没泄漏检测 (underwater immersion leak test) 或“浸泡检测 (dunking test)”，是一种通过排放气泡来检测和定位被测物泄漏的试验方法。

如图1所示，气泡捡漏法的基本原理是设法使浸泡在水介质中的被检对象内外产生压力差，如果存在泄漏，则高压气体通过泄漏点向低压流动，在低压侧可以观察到泄漏气体在水中产生的气泡，由此来检测泄漏，具有操作简便、快捷和低成本的特点。

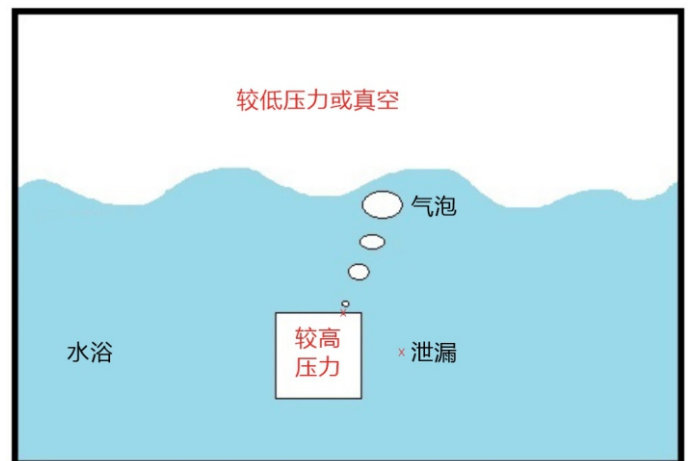


图1 气泡泄漏检测方法基本原理

气泡泄漏检测方法的灵敏度受压力差、加压气体和起泡溶液的影响。目前气泡泄漏检测方法主要依据以下两种技术和相应方法：

(1) 加压技术：给被检对象内部直接用气体加压，在被检对象外部直接施加起泡溶液或将被检对象直接浸入溶液，根据泄漏气体通过液体时形成的气泡，确定被检对象是否泄漏及漏孔位置。相应标准为 ASTM F2096 “通过内部加压检测医用包装严重泄漏的标准试验方法”。

(2) 真空技术，适用于检测时不能直接加压设备的泄漏检测方法。在被检设备壳体局部区域施加起泡溶液，然后通过真空罩使这一局部区域两侧形成一定的压力差，如有泄漏发生，则会在压力低的一侧产生气泡，从而可以确定泄漏产生的部位。相应标准为 ASTM D3078 “通过气泡排放测定软包装渗漏的标准渗漏试验方法”。

国家标准 GB/T 34637 “无损检测 气泡泄漏检测方法”将上述两种方法进行了汇总，对于刚性容器的检漏也有相应标准 ASTM D4991 “用真空法测试空刚性容器泄漏的标准试验方法”，但基本原理都相同。本文将对这种气泡泄漏检测方法进行分析，介绍相应的特点和局限性，由此引出后续将介绍的目前气体泄漏检测新技术。

## 2. 两种气泡法检漏装置简介

依据上述气泡法的测试系统是一种能够检测、定位和一定程度上量化气泡排放泄漏的装置，检漏装置主要由两部分组成。第一个组件是一个在被检对象内外之间产生压力差的装置，该压力差将开始驱使对象的内部气体通过泄漏路径从较高压力（对象内部）流向较低压力（对象外部）。这种压差的形成通过两种方式实现：

(1) 通过插入或连接压力探针（加压管线）进行内部加压。这意味着内部压力大于环境空气压力。

(2) 通过将对象放置在真空室中来抽真空。这意味着对象内部的压力是大气环境压力，而对对象外部的压力小于环境压力。

检漏装置的第二个组成部分是浸没液体介质。这种介质（在大多数情况下是水）将使操作者能够检测到从泄漏的被检对象中发出的气泡。浸没液体介质有时可以是油、酸浴或其他液体物质，该液体主要是充当能够视觉检测气泡的介质。

### (1) 采用内部加压技术的检漏装置 (ASTM F2096)

在采用加压技术的检漏装置中，对于柔性被检对象的检漏，理想方法是通过插入皮托管式静态探针针对被检对象进行内部加压，或直接通过刚性被检对象的管路和接口进行内部加压，如图2所示。该装置需要一个压力控制系统，该系统由压力源、高精度压力控制器和压力计组成，可实现较宽范围的精确压力控制以满足柔性和刚性被检对象的加压检漏需求。

对于柔性被检对象，内部加压方法有时需要静态探针刺穿被检对象，以便进行内部加压。内部加压方式可以更好地控制压力，处理被检对象，如在测试过程中转动或旋转袋子。

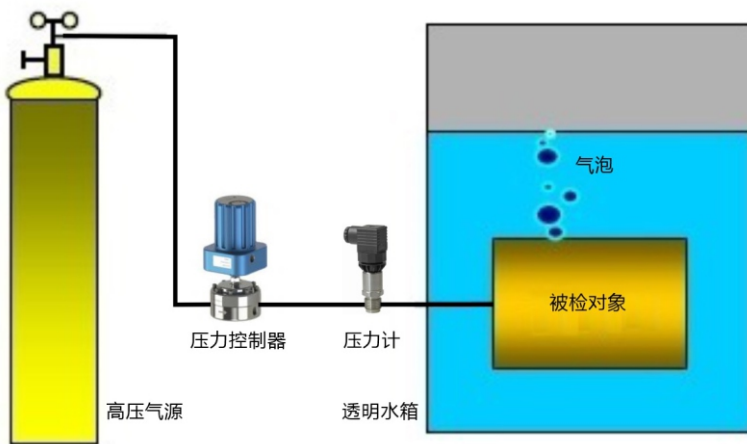


图2 气泡法内部加压检漏装置结构示意图

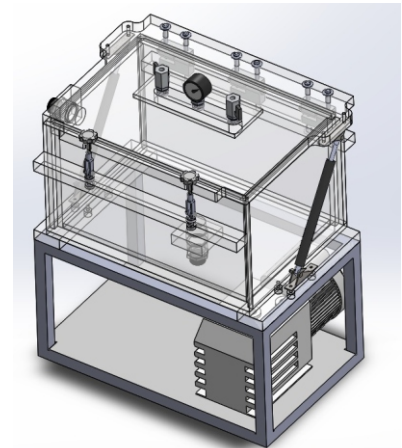


图3 气泡法外部真空检漏装置

### (2) 采用外部真空技术的检漏装置 (ASTM D3078)

在采用外部真空技术的检漏装置中，最理想的是丙烯酸塑料（亚克力）材料制成的真空室，如图3所示。因为丙烯酸塑料是透明的，能够在测试过程中看到漏气过程的全貌。就检测准确性而言，它也是最具成本效益和最划算的。

该真空室必须与真空泵连接，该真空泵可以是旋转叶片泵或文丘里泵。旋转叶片泵由电力驱动，将产生更高的真空，并且不需要加压供气来运行。另一方面，文丘里泵不需要电力，将产生较低的真空，且需要压缩空气源。

### 3. 两种气泡检漏法的对比分析

对于上述内部加压和外部真空这两种气泡检漏法在实际应用中的选择，往往并没有明确的答案。选择哪一种气泡检漏法要根据被测对象的具体情况而定。表1列出了两种检漏方法对比。

表1 两种气泡法检漏技术对比

测试方法	外部真空法	内部加压法
ASTM 标准指导文件	D3078	F2096
要求	真空	压力
样本调查	不需要穿刺	包装必须穿刺
测试期间的处理	在泄漏测试期间不能旋转	在测试期间可以旋转
压差精度	低精度	更高精度
系统复杂性	更复杂的真空系统	不复杂的压力系统

当涉及到标准测试方法指导文件时，方法会有所不同。外部真空法和内部加压法分别以 ASTM D3078和F2096为依据。外部真空法需要真空源，如采用真空泵或压力驱动的文丘里泵，内部压力法需要压力源和压力调节设备，不要求在真空法泄漏测试期间刺穿被检对象，而内部加压法则需要用探针刺穿样品以充入空气。在真空室内进行测试时，不能旋转或处理样品，这可以通过内部加压方法来实现。另外，加压法的压差更高、压力控制更好和更精确，因为可以更精确地控制压力。真空系统更复杂，因为内部腔室是气密和密封的，以便能够抽真空，且压差较小。

### 4. 气泡法检漏特点分析

通过上述对气泡法检漏装置的介绍和对比，概括地说，气泡法检漏测试有如下特点优点。

(1) 经济且有效的密封性能测试：涉及到产品的密封性能测试评价，没有比水浸气泡法泄漏测试更好的方法了，而事实上，比气泡法更好的方法要贵一两个数量级。

(2) 简单易行的泄漏测试：将测试样品放入水浴中，抽真空或加压，寻找气泡，这是一种非常简单的检测和定位泄漏的方法。这在实际应用中非常便利，操作人员不需要太多的技术培训就可以进行检漏测试。

(3) 泄漏小袋和包装的实际测试：所有需要仅是一个丙烯酸塑料箱和一个真空泵来进行检漏测试，对于大多数商业和医疗包装来说，测试的准确性也相当不错。

(4) 包装泄漏的视觉检测和定位：泄漏可以在几秒钟内可通过视觉进行检测和定位。

(5) 快速样品制备：许多被测样品无需太多准备，这意味着测试流程可以非常顺利地进行。

(6) 通用测试方法：气泡泄漏测试可用于各种形状和大小的被测对象。

气泡法作为一种最传统的检漏技术，仍然在众多领域得到应用。然后根据研究表明，当结果依赖于人工视觉检查时，近30%的泄漏被遗漏，且通常检测效率和灵敏度低，需要操作人员目视识别泄漏。其面临的挑战主要包括：

(1) 如不加精密的真空压力控制，难以保持一致的测试条件。

(2) 水很容易被污染。

(3) 粘性物质可以掩盖测试过程中的泄漏。

(4) 由于测试时间长、测试后清洗和干燥被检对象。

(5) 对于较大尺寸的被检对象，大型水箱和吊装装置会占用场地和空间。

气泡法检漏测试的具体缺点是：

(1) 破坏性测试：即使包装的内部没有被水损坏或破坏，气泡法泄漏试验也被认为是破坏性试验，皮托管式静压探头的插入会在包装上造成一个穿孔。

(2) 主观泄漏检测方法：气泡排放需要测试人员的参与，这给测试方法带来了主观性。测试操作员必须参与测试，否则可能会出现漏检。

(3) 密封被检对象的制备和处理：必须清洁被检对象，并为泄漏试验做好准备。此外，有些人可能不喜欢处理潮湿对象所带来的不便。

(4) 测试程序取决于被检对象：对水敏感的被检对象，如电子设备，可能不适合这种测试方法。泄漏无法量化，没有办法知道泄漏的大小，只能知道泄漏在哪里。

## 5. 气泡法检漏技术的局限性

气泡法检漏中产生气泡的唯一原因是因为在被检对象的内部和外部之间存在压力差，气体被从较高压力的环境驱入较低压力的环境，由此所带来的局限性如下：

### (1) 最小可检测漏率

真空泄漏测试专家的共识是气泡法测试的最小可检测泄漏率为每秒0.001标准立方厘米，这意味着在每秒0.001标准立方厘米的漏率下，1立方厘米的泄漏大约需要100秒。

### (2) 渗透性材料的气泡泄漏试验

气泡泄漏测试不能在可渗透材料上进行，因为气泡泄漏测试开始时，数百个气泡开始从材料中冒出，这将使得定位和精确定位漏洞几乎不可能。

### (3) 气泡视觉检测的主观性

当我们研究气泡出现的频率和大小时，这种测试方法的主观性也受到质疑。假设在气泡泄漏实验中肉眼可以合理看到的最小气泡直径约为1mm，并假设一个直径为1mm的完美气泡球，因此气泡的体积为0.000524标准立方厘米。这意味着在0.001scc/s的泄漏率下，被检对象每秒钟将放出约2个气泡。

### (4) 内部真空法导致有限空气滞留

真空法的另一个局限性是，被检对象的起始压力一般是一个大气压，被检对象内部的空气量有限。在检漏过程中被检对象中存在的空气越来越少，因此压力越来越低，这意味着在低空气体积下，没有足够的空气从样品中排出用于适当的检测。

### (5) 加压法和真空法不同

最后，如果被检对象已经加压到高压，真空室可能就没有太大的意义。我们这里假设被检对象已经被加压到200psi的绝对压力，然后浸入一个气泡测试槽中。漏率由以下公式得到：

$$Q = (P_1 - P_2) \times R \left( \frac{V}{t} \right)$$

式中：Q代表漏率；P1代表试样内部压力；P2代表试样外部压力；R代表气体常数；V代表体积；t代表时间。从公式可以看出，这仅仅意味着压差乘以常数乘以体积随时间的变化决定了漏率大小。为了更直观的说明问题，假设R、V和t都是1：

若被检对象已加压到200psi，标准大气环境压力为15psi，那么漏率为200-15=185。

若这个加压对象浸入一个水箱容器并抽真空，压力差将是200psi，即漏率为200-0=200。

由此可见漏率测量值只提高了7.5%，这意味着会看到多了7.5%的泡沫。如果被检对象可以采用加压法检漏，那么将具有这种内部加压的对象放入真空气泡泄漏箱就没有多大意义。

另一方面，在真空法检漏中，如果被检对象在15psi的标准大气环境压力下密封，浸入一个水箱容器并抽真空，压力差最大也只能是15psi，即漏率为 $15-0 = 15$ 。由此可见，压差越大，漏率越大，则可观察到的气泡越明显，说明加压法要比真空法的测量灵敏度更高。

## 6. 压力衰减法检漏技术

为了进一步解决上述气泡法检漏中的局限性，在气泡法基础上发展起来的压力衰减法泄漏检测技术逐渐成为当今最常用的方法。它的简单性使其易于自动化并集成到生产和装配过程中。

简而言之，压力衰减法测试是用空气填充被检对象直到达到目标压力，切断气源以隔离压力，并测量该压力在设定时间段内的衰减（损失），任何压力损失都表明存在泄漏。压力衰减法的灵敏度是测试部件尺寸和测试时间的函数，大多数测试都可以相当快速地执行，并获得高度准确的结果，但零件越大，获得准确测试结果所需的周期时间就越长。压力衰减法具体方法包括：

- (1) 压力衰减的dP和dP/dT微分法。
- (2) 压力衰减的泄漏标准校准法。
- (3) 压差衰减的dP和dP/dT微分法。
- (4) 压差衰减的泄漏标准校准法。
- (5) 体积填充（密封设备）检漏法。

以上压力衰减法详细内容将在后续文章中进行详细介绍。因为压力衰减法的应用可实现检测自动化，给检漏测试带来以下几方面的改进：

### (1) 自动化泄漏测试节省时间和金钱

在制造过程中自动进行空气泄漏测试可以节省时间、金钱和工时。可自动按照设定确定是否符合泄露标准，一旦出现问题泄漏测试仪将通知生产线操作人员，可更快地发现产品缺陷，最大限度地缩短周转时间。

### (2) 精确和可重复的精密制造方法

与传统的水浸气泡法相比，自动化空气泄漏测试可提供更高准确度和可重复性的精确结果。

### (3) 可扩展的自动检漏系统符合您的要求

制造过程中使用的数字泄漏测试系统允许扩大生产规模并提高质量保证测试的速度。多种类型的泄漏测试仪可满足不同的需求，不同方法和规格的自动泄漏测试系统可满足大多数需求。

### (4) 适用于任何行业制造的自动化泄漏测试方法

随着制造方法变得更加自动化、先进和数字化，生产的各个方面都必须跟上步伐。制造过程中使用的自动泄漏测试是在满足需求的同时认证产品质量的绝佳方式。自动化泄漏测试最大限度地提高了各行业的效率，但在制造业尤其有用，典型应用领域有医疗设备和部件、药物、汽车零部件、航空航天部件、消费品和电子产品、包装等应用。

### (5) 制造过程中的自动空气泄漏测试创造了更高效的系统

制造过程中使用的自动空气泄漏测试将提高应用系统的整体效率，同时提高最终产品的质量。压力衰减法泄漏测试是非破坏性的，因为它使用干燥的空气来检查缺陷，并且具有较小的物理足迹。