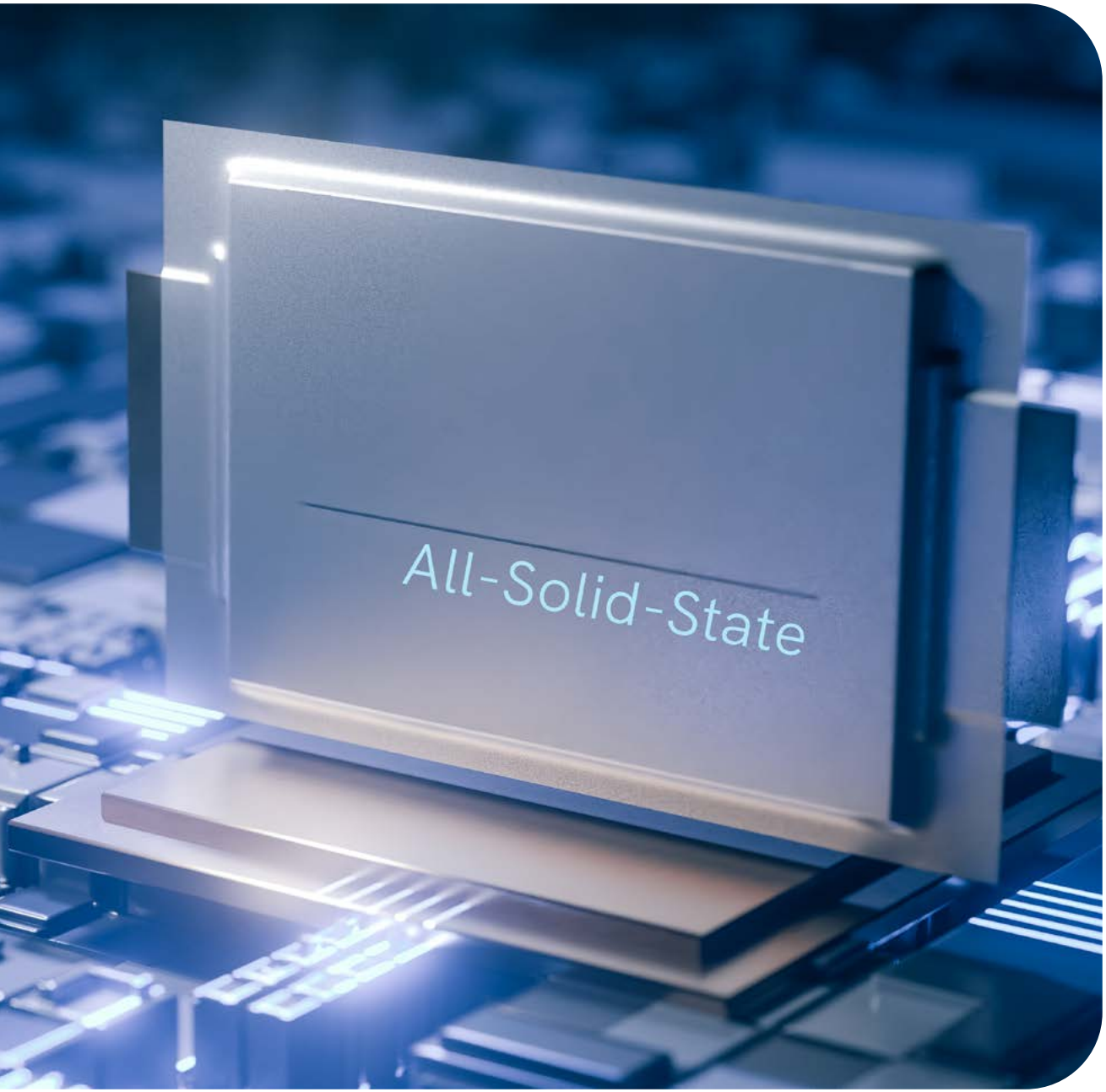


白皮书

全固态电芯的泄漏测试

为何下一代电池需要采取新的质量控制方法

INFICON

尊敬的读者：

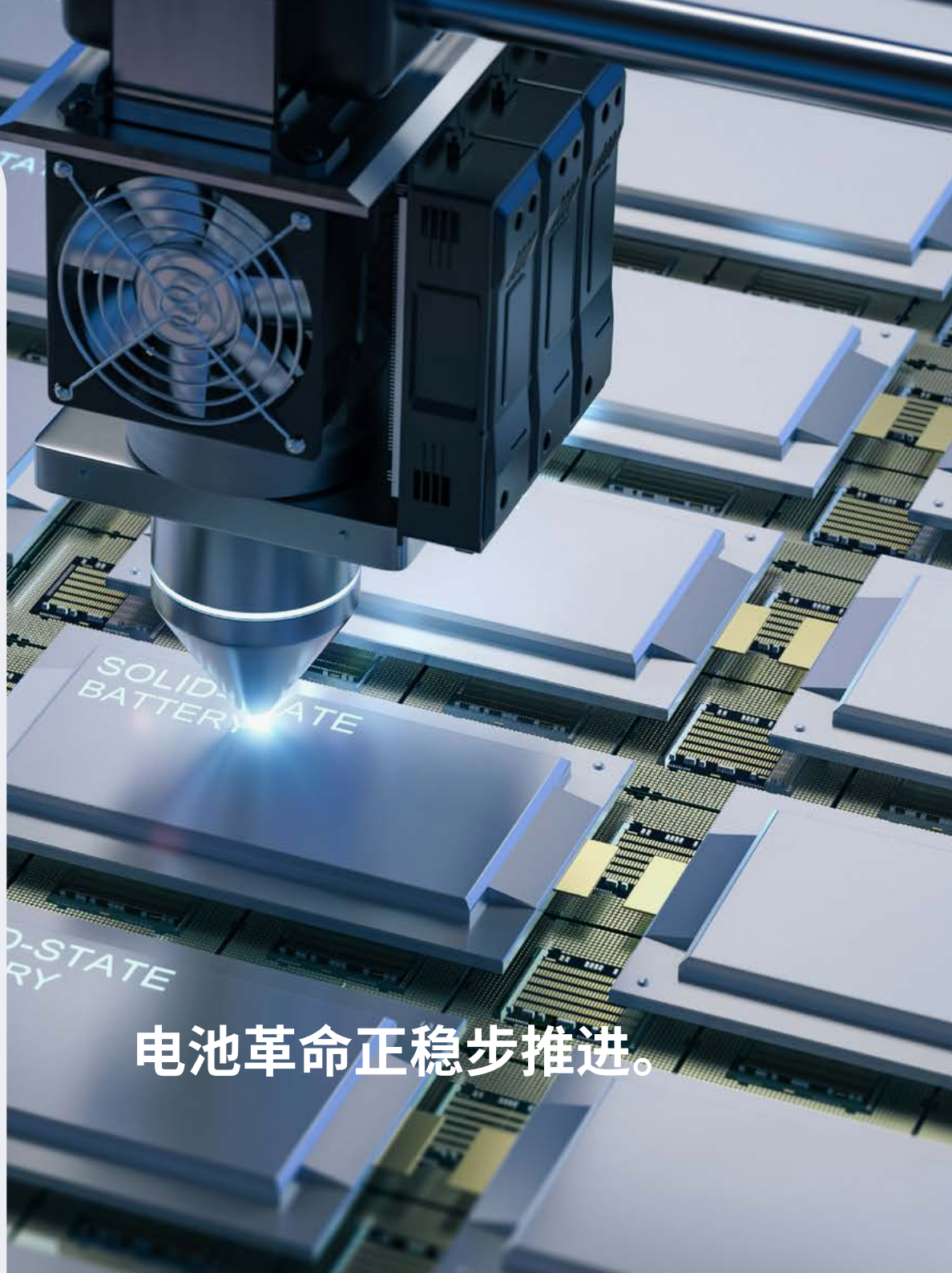
全球向电动出行和电网存储的转型，对电池技术提出了前所未有的要求。传统的锂离子电芯——采用液体或凝胶状电解液——虽然一直表现良好，但在能量密度、安全性和使用寿命方面，已逐渐接近其物理极限。行业的解决方案是全固态电池（ASSB）：这是一种根本上不同的电池架构，它用固态离子导体取代了所有液态电解液。

其前景令人振奋：能量密度显著提升，彻底消除电解液泄漏和热失控的风险，且循环寿命大幅延长。因此，几乎所有主要汽车制造商和电池制造商都在全固态电池技术上投入巨资，亚洲、北美和欧洲地区的商业化生产时间表也在不断提前，这并不令人意外。

在正在研发的固态电解质化学体系中，硫化物基电解质已凭借其在高性能汽车应用领域的领先地位脱颖而出，其离子电导率在所有固体材料中位居首位。然而，随着未来十年预计将出现巨大的生产规模，一个紧迫且常被低估的挑战随之而来：如何可靠地测试密封全固态电芯的完整性？本白皮书旨在向您阐明，为何传统的泄漏测试方法无法满足全固态电池的需求，以及一种稳健且适用于量产的质量策略应具备哪些特征。

我们很乐意通过一对一交流为您进一步说明！

INFICON团队



目录

1. 为何泄漏检测比以往任何时候都更为重要 4

2. 全固态电池（ASSB）泄漏检测的不同方法 5

2.1 为何氢气$_2$S检测为何力有未逮 5

2.1.1 灵敏度问题

2.1.2 检测窗口狭窄

2.1.3 可重复性问题

2.1.4 过程与安全隐患

2.2 氦轰击法：最合适的方法 8

2.2.1 可重复性

2.2.2 灵敏度与流量

2.2.3 安全性与通用适用性

3. 为何检漏仪的选择至关重要 9

3.1 研发阶段的全固态电池泄漏测试 10

3.2 大规模生产中的全固态电池测试 10

4. 附录 11

4.1 法律声明 11

4.2 插图来源 11

4.3 INFICON 公司简介 12

1. 为何电解液泄漏检测比以往任何时候都更为重要

在传统的锂离子软包或棱柱形电池中，电解液呈液态。电池外壳上的任何缺陷——无论多么微小——最终都会显现出来：水分侵入会引发危险的化学反应，最终导致电解液蒸气逸出，从而造成电化学性能的劣化。传统电池的泄漏测试正是利用了这种脱气行为。高灵敏度的检测器能够识别极微量的电解液蒸气泄漏，从而提供可靠的质量把关机制，在缺陷电池进入市场之前将其与合格电池区分开来。

全固态电池彻底打破了这一模式。它没有会泄漏的液体，也没有可检测的蒸气。固态电解质不会脱气。对于传统锂离子电池和半固态电池泄漏检测方法行之有效，但对于全固态电池（ASSB）而言，密封缺陷基本上是无法被这些方法检测到的。

然而，全固态电池密封失效的后果同样严重——甚至可以说更为严重。硫化物基电解液对水分极其敏感。即使通过微小缺陷渗入的微量大气湿度，也会与硫化物材料发生反应，降低离子电导率，并在内部产生剧毒的硫化氢（H_2S）气体，并永久性地损害电池性能。即使通过了目视检查和初步电气测试的电池，仍可能存在针孔大小的缺陷，一旦安装在车辆上，将大幅缩短其使用寿命或引发安全隐患。

风险极高：若缺陷电芯逃过最终检测并流入市场，将引发代价高昂的召回、保修索赔及声誉受损。

这意味着ASSB制造商面临真正的两难困境。泄漏测试并非可选项——而是制造业过程中的必要环节。但传统锂离子电池中行之有效的方法并不适用。需要一种全新的方法。





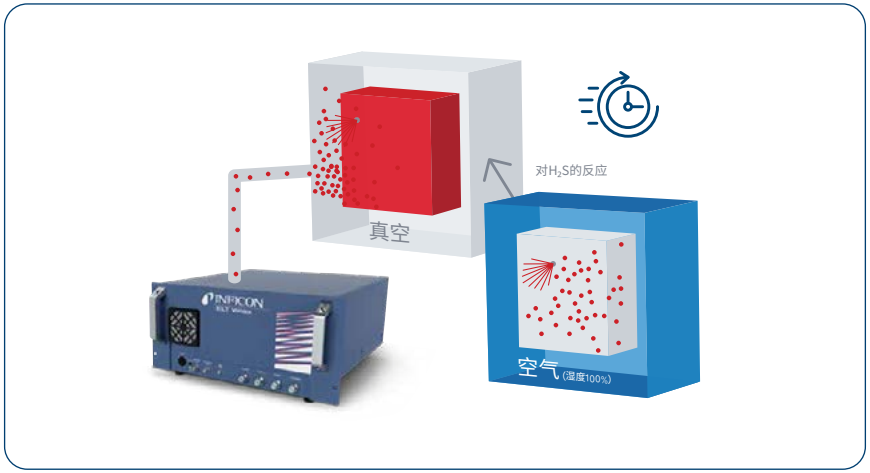
2. ASSB 电解液泄漏检测的不同方法

首次接触这一问题的工程师往往会想到一个直觉上颇具吸引力的想法：既然硫化物电解液会与水分反应生成 H_2S，为何不直接利用该反应作为检测机制呢?向电池充入饱和湿空气，随后检测逸出的H_2S。这种逻辑极具诱惑力——你实际上是在检测想要预防的失效模式。

第二种方法借鉴了汽车安全部件和制冷等行业的精密泄漏测试技术，即氦轰击法：用氦气对电池进行加压，然后使用灵敏的质谱仪检测通过缺陷逸出的氦气。这两种方法都值得仔细研究，因为它们在实际应用中的表现存在显著差异。

2.1 为何 H_2S检测存在不足

H_2S充气测试过程如下：将密封的ASSB电池放入测试腔室，并置于饱和湿

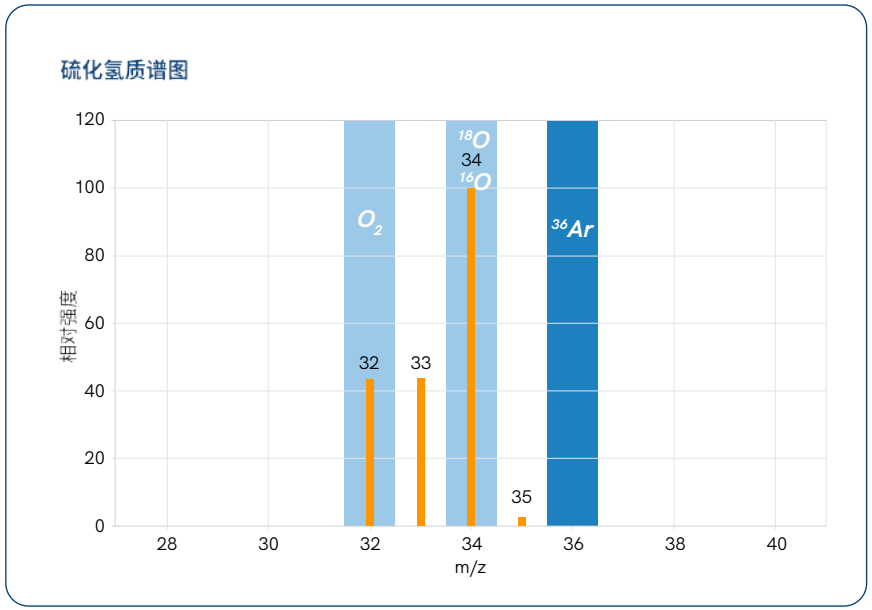


电解液 H_2S 电解液泄漏检测方法

气的环境中——例如在5巴的超压下暴露约30分钟。任何渗入缺陷通道的水分都会与硫化物电解液反应，在电池内部生成H_2S气体。随后将电池置于真空环境中，由监测器监测是否存在H_2S泄漏。理论上，这一过程看似精妙。但在实践中，它却受制于根本性的局限，因此无法作为可靠的生产质量控制标准。

2.1.1 灵敏度问题

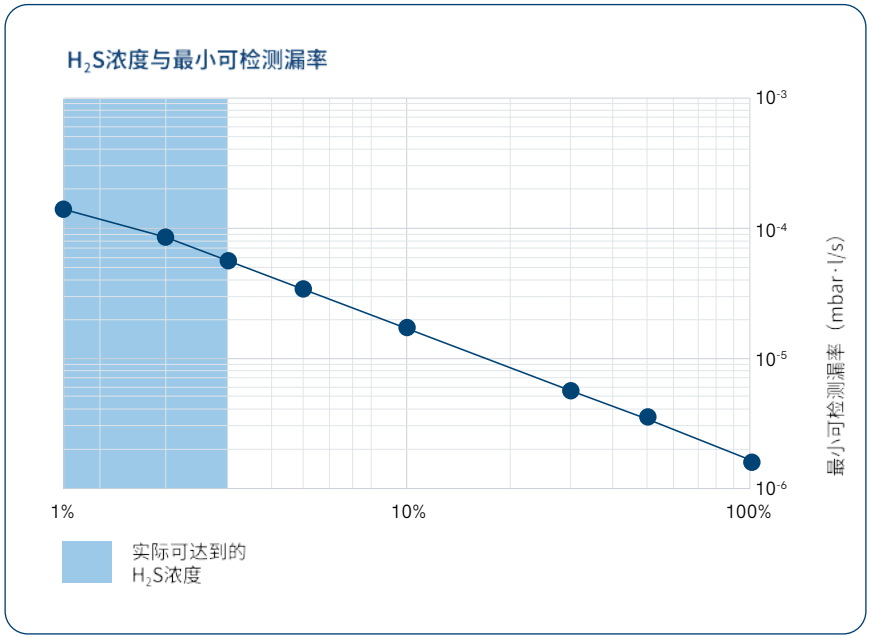
在质谱仪的传感器中，H_2S会在质量数为34处产生信号，而空气中含量极高（21%）的氧气也会产生相同的信号。这导致H_2S的检测灵敏度受到限制。由于部件表面和腔室内残留的微量氧气导致本底噪声升高，H_2S的最小可检测泄漏率在$2 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s范围内（假设电芯头空间中100%为H_2S）。



来源：NIST 网络手册

缺陷电池内部实际可积累的 H_2S 量取决于空气中的水分含量——20 °C 时最大约为 2%——以及水与硫化物电解液之间的反应动力学。已发表的研究（Yersak等人，通用汽车研发部）证实，在实际爆炸条件下，电池顶部空间中的 H_2S 浓度将介于 1% 至最多 5% 之间。

当电池头部空间的 H_2S 浓度为 1% 时，可检测到的最小漏率约为 $2 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s —— 这意味着只能检测到相对较大、明显的粗漏。当 H_2S，这一数值提升至 $3.5 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s，但仍远低于可靠进行 ASSB 质量控制所需的灵敏度水平——该水平在 10^{-6} mbar·l/s 左右的低值范围内。



2.1.2 狭窄的检测窗口

针对不同泄漏量的理论分析揭示了另一个问题：

✓ 极微小的泄漏（$1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s）：H_2S的平衡浓度仅为 6 ppm——在空气本底之下，任何实际设备均无法检测到。

✓ 中等泄漏 （$1 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s）：信号可检测（约 60 ppm），且有足够时间完成测量。

✓ 大泄漏（$1 \cdot 10^{-4}$mbar·l/s 及以上）：电池排空速度如此之快，以至于H_2S在测量开始前就已经逸出——该缺陷因此完全被忽略。

H_2因此，S检测在生产条件下仅适用于极其狭窄的漏率范围，既无法检测到最微小的缺陷，也无法检测到最明显的缺陷。

泄漏量	所有 H_2S 从电池中逸出所需的时间	处于平衡状态的 H_2S 量	备注
$1 \cdot 10^{-6}$· mbar l/s	5000 s	**6 ppm**	**无法检测**
$1 \cdot 10^{-5}$· mbar l/s	500 s	60 ppm	**足以进行检测且在硫化氢逸出前有足够时间的量**
$1 \cdot 10^{-4}$ · mbar l/s	**50 s**	600 ppm	**泄漏过快导致气体耗尽的风险，可能发生在抽真空过程中**
$1 \cdot 10^{-3}$ · mbar l/s	**5 s**	6000 ppm	**泄漏在抽真空过程中就已耗尽的风险**

2.1.3 可重复性问题

通过H_2S检测测得的漏率不仅取决于缺陷尺寸，还取决于测量瞬间电池内部的H_2S浓度。产生的H_2S浓度的产生不仅取决于充气时间、温度和压力，还取决于暴露于湿度的电解液表面积以及电池内部容量。而表面积又会因表面粗糙度、孔隙率及电池设计而有所不同。

综上所述，H_2S浓度产生于湿气冲击过程，无法复现。因此，对于给定尺寸的缺陷，显示的漏率会因所有这些不稳定变量而变化。同一个缺陷在一次测试循环中可能通过，但在另一次测试循环中却可能失败。一种无法始终如一地以相同方式识别同一缺陷的泄漏测试，无法提供真正的质量保证。

2.1.4 工艺与安全问题

H_2S 湿气轰击还会向生产环境中引入水分——这对 ASSB 制造业而言是一个严重的问题，因为该工艺必须严格控制湿度。此外，H_2S 本身具有高度毒性，其即时危险阈值仅为 50 ppm。管理 H_2S作为生产测试气体，会增加复杂性、安全基础设施要求及监管负担。

此外，H_2S检测本质上仅限于硫化物基电解液体系；它完全无法应用于氧化物基或聚合物基全固态电池。

结论很明确：H_2S检测并非适用于所有固态电池的生产泄漏检测方案。其灵敏度过低、结果不稳定、过于依赖特定化学体系，且危险性过高，无法作为可靠的质量把关手段。

2.2 氦轰击法：最合适的方法

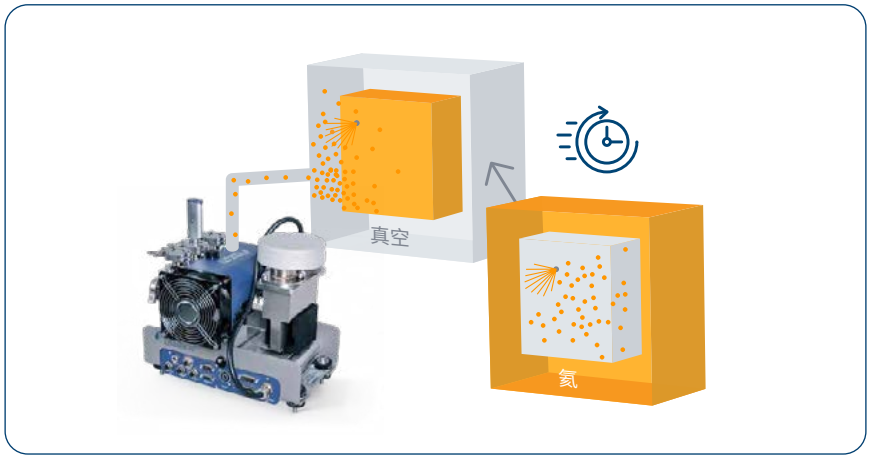
氦气作为示踪气体

- ✓ 惰性、无毒
- ✓ 无监管问题
- ✓ 使用安全
- ✓ 空气中浓度低（5 ppm），无交叉灵敏度
- ✓ 粘度低——能快速穿过微小泄漏点
- ✓ 泄漏检测灵敏度最高

氦轰击法泄漏检测是一项成熟且经过验证的技术，几十年来一直应用于要求严苛的领域——最显著的例子是汽车安全气囊气体发生器和点火器的测试，在这些应用中，密封失效的后果将不堪设想。

该方法操作简便：将电芯置于压力容器中，在高压条件下（通常约为 5 巴）通入氦气，并保持预设的通气时间——例如 30 分钟。

氦气作为最小的惰性气体，在此阶段会渗透到任何缺陷通道中，并在电池内部积累。随后，电池被转移到与氦气专用质谱仪相连的测试腔室中，该质谱仪能以极高的灵敏度测量真空条件下逸出的任何氦气。



氦轰击法泄漏测试方法

2.2.1 可重复性

轰击过程中有缺陷电池吸收的氦气量由简单且已被充分理解的物理定律决定：亨利定律和菲克扩散定律。对于给定的缺陷尺寸、氦轰压力和持续时间，各电池内部的氦气浓度具有高度一致性。因此，测得的漏率能够可靠且可重复地反映实际缺陷尺寸——同一缺陷每次都会产生相同的信号。

2.2.2 灵敏度与流量

氦质谱分析法的检测极限比H_2S检测极限高出几个数量级——这主要是因为空气中的氦气浓度极低（5 ppm）。关键在于，更高的设备灵敏度能直接提升生产效率：灵敏度更高的检测器可缩短充氦时间，因为电芯内只需积累更少的氦气即可产生可测量的信号。充氦时间的缩短意味着更高的吞吐量和更低的单个电芯测试成本。诸如 LDS3000等氦气泄漏检测仪，能够检测低至 $1 \cdot 10^{-8}$ mbar·l/s 的漏率。因此，即使在充氦过程中仅有 1% 的氦气被注入电芯，仍可检测到 $1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s 的漏率。

章节	样品电芯 1	样品电芯 2	样品电芯 3	样品电芯 4
1 bar → 0 bar 时的拒收漏率	$1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s @100 % He			
内部死体积	0.4 ml			
充气压力（绝对值）	7 bar	10 bar	10 bar	10 巴
电芯绝对压力	150 毫巴			
所需充气时间	58 分钟	33 分钟	10 分钟	3.5 分钟
电芯内氦气浓度	40 %		17 %	6 %
触发漏率 @150 mbar → 0 bar	$1 \cdot 10^{-7}$ mbar·l/s	$1 \cdot 10^{-7}$ mbar·l/s	$1 \cdot 10^{-8}$ mbar·l/s	$1 \cdot 10^{-8}$ mbar·l/s

不同氦气充填和测试参数下小袋电池的计算示例

2.2.3 安全性与通用适用性

氦气完全惰性、无毒且不易燃。它对生产人员不构成任何风险，无需特殊的安全基础设施，也不会带来监管上的复杂问题。与 H_2S检测不同，氦轰击法不受化学性质的影响：无论是硫化物基、氧化物基还是聚合物基的 ASSB，其检测效果均同样出色。随着行业的发展，基于氦气的测试系统仍适用于所有变体。

两种方法都需考虑一个重要因素：由于 ASSB 电池内部容量非常小，大泄漏可能会导致氦气迅速逸出，以致在测量阶段开始前的腔室抽真空过程中，电池内的氦气就已经耗尽。过程设计必须考虑到这一点，以确保能够可靠地检测出微小和明显的缺陷。

3. 为何检漏仪的选择至关重要

选择氦轰击法作为测试方法只是第一步。第二步（同样重要）是选择合适的检漏仪。在 ASSB 生产中，设备的性能特征直接决定了测试结果的质量。



✓ **灵敏度与循环时间：** 决定了系统能够可靠检测到的最小缺陷尺寸，并能缩短充氦时间——对于每年数百万个单元的生产规模而言，这是一项重要的经济杠杆。



✓ **可重复性：** 能够对同一缺陷在多次测试中返回相同的测量结果，这是建立有效质量控制关口的基石。



✓ **速度：** 检漏仪必须能够集成到自动化生产线上，其快速循环时间需与电池组装流量相匹配。



✓ **长期稳定性：** 基线和校准的稳定性可确保在工艺验证期间设定的报废阈值在整条生产线生命周期内始终有效。

从所有这些维度来看，氦气泄漏检测仪绝非普通商品。它是一种关键的工艺设备，平台的选择将直接影响良率、流量以及最终的产品质量。

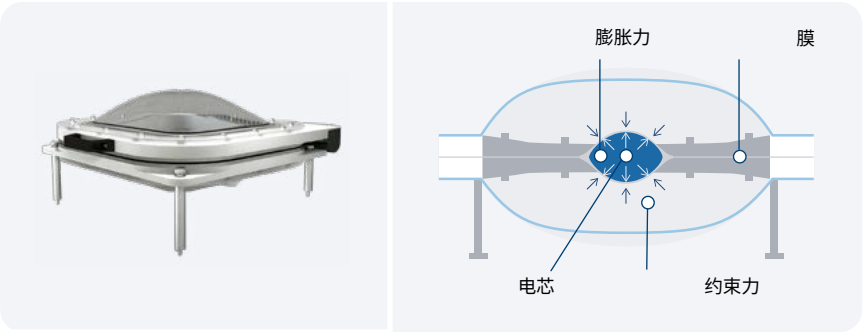
3.1 研发阶段中对ASSB的泄漏测试

对于试生产线上和研发应用中，该UL3000便携式氦气泄漏检测仪是理想之选，因为它是一款独立式检漏仪（无需集成）。它基于与LDS3000 但配备了轮子，因此非常适合间歇性使用。



UL3000 氦气泄漏检测仪

特别是对于研发部门而言，使用一种在真空状态下能为易碎袋式电池提供全面支撑的柔性腔室非常有益。袋式电池放置在腔室的两层膜之间，当两层膜之间形成真空时，便构成一个体积极小的腔室。由于膜片总能形成完美的定制腔体，因此无需针对不同的电池规格进行定制。INFICON提供两种不同尺寸的柔性腔体，可与氦气泄漏检测仪配合使用。



柔性真空腔体中的平衡真空效应

3.2 大批量生产中的ASSB测试

针对 ASSB 氦轰击法泄漏测试，INFICON 提供 LDS3000：一款专为集成到自动化生产线上而设计的高灵敏度氦气泄漏检测仪。

凭借业界领先的灵敏度、快速的检测周期，以及大规模电池生产所要求的稳定性和可重复性，LDS3000 使氦轰击法成为 ASSB 电池实用且适用于量产的质量把关环节。



LDS3000 氦气和氢气泄漏检测仪

4. 附录

4.1 法律声明

由科隆 INFICON GmbH（www.inficon.com）发布

注：本白皮书中包含的所有外部网站链接在撰写时均有效。但这些链接的内容和目标地址可能随时发生变更，恕不另行通知。

© INFICON 2026

4.2 插图来源

第 4、5、6、8、10、12 页数的产品图片、插图及图片：INFICON HOLDING AG

封面图片及第 #2、#12 页数的图片：Shutterstock

4.3 INFICON 公司简介

INFICON 是创新设备、关键传感器技术以及智能制造/工业 4.0 软件解决方案的领先供应商，致力于提升工具、流程及整厂的生产效率和质量。该公司的分析、测量和控制产品对于空调/制冷、汽车制造业、半导体制造以及光学、平板显示器、太阳能电池和工业真空应用中的薄膜涂层领域的气体泄漏检测至关重要。其他采用真空工艺的领域包括生命科学、科研、航空航天、包装、热处理、激光切割以及众多其他工业领域。INFICON 还利用其真空技术专长，为应急响应、安全防护和环境监测提供独特的毒性化学品分析产品。

在电池生产领域，从第一代大尺寸锂离子电芯到目前正在全球建设的固态电池生产线，INFICON 始终是值得信赖的质量控制合作伙伴。该公司的专业能力不仅限于硬件：应用工程师已针对整个生产链中的各类电芯规格，直接定义并验证了氦轰击法测试流程；深入理解小容量电芯中氦气吸附与脱气的物理原理；并制定了监管机构和原始设备制造商（OEM）客户所需的校准与验证方案。

INFICON 总部位于瑞士，在欧洲、美国和中国拥有世界一流的制造业基地，并在中国、丹麦、芬兰、法国、德国、意大利、日本、韩国、列支敦士登、马来西亚、墨西哥、新加坡、瑞典、瑞士、台湾、英国和美国设有子公司。INFICON 的注册股份（股票代码：IFCN）在瑞士 SIX 证券交易所上市。









准备好制定您的全固态电池（ASSB）泄漏测试策略了吗？

向全固态电池的转型正在进行中。泄漏测试至关重要，且技术复杂度极高，绝不能任其随意进行。立即联系 INFICON。我们的电池应用专家已准备好与您探讨电池规格、生产规模、泄漏率要求以及生产线集成限制等事宜。

请访问 inficon.com 或联系您所在地区的 INFICON 代表，安排咨询。

联系我们



INFICON GmbH Bonner Str. 498, 50968 德国科隆

电话：**+49(0)221 56788 100** | 电子邮件：reach.germany@inficon.com | 网站：www.inficon.com