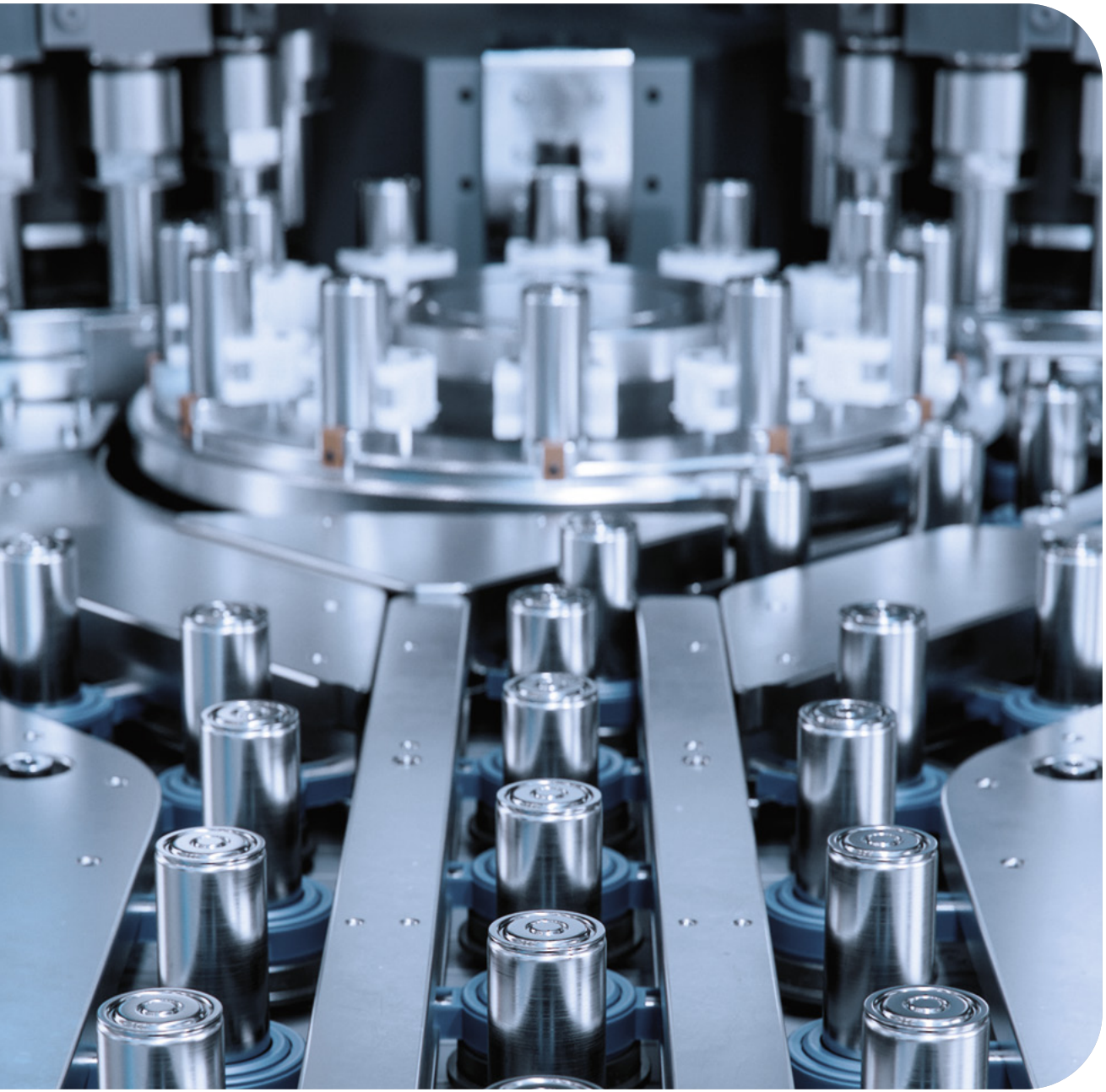


白皮书

23条显著提升电池产能的技巧

以下领域的优化机会：

- ✓ 电极生产
- ✓ 电芯组装
- ✓ 生产线末端测试
- ✓ 固态电池生产

INFICON

亲爱的读者：

电池行业正在蓬勃发展——随之而来的，是对质量、成本效益和工艺可靠性的更高要求。在每千瓦时（kWh）价格不断下降的背景下，要保持竞争力，就必须对制造业流程实施更严格的控制——循序渐进，并逐步实现自动化。

本白皮书为您提供了23条专业建议，助您获取所需的数据和指标，从而做出明智的工艺决策。重点关注电芯生产的四个关键领域：电极制造、电芯组装、生产线末端测试，以及作为独立章节的全固态电池——其固态电解液对电解液泄漏检测提出了全新的要求。

无论是电极干燥过程中的真空监测、利用直接电解液泄漏检测对已注液电池进行可靠的泄漏测试，还是半固态和全固态电池面临的特定挑战：这 23 条建议将向您展示生产中仍存在哪些优化空间。

您的 INFICON团队

目录

1. 优化电极生产的四个技巧 4

1.1 通过精准的工艺监测与控制，防止浆料受到污染。 4

1.2 在电极烘烤过程中，控制真空度以实现最高工艺效率。 4

1.3 监测干燥过程中的残留水分，可最佳地确定干燥终点并节约能源。 5

1.4 选择真空计，其具备抗常见污染物的特性，从而提高您的生产设备运行时间。 5

2. 提升电芯组装质量的七条建议 6

2.1 在灌注电解液前对硬壳电芯进行泄漏检测，即可避免因灌注失败而报废外壳和浪费电解液。 6

2.2 可靠的真空计可提高氦气泄漏测试过程中的可重复性，并确保 设备运行时间最大化。 7

2.3 电芯的全自动干燥过程需要快速、准确的实时压力监测。 7

2.4 精确控制灌注系统的压力，使其维持在 范围内，以避免不必要的吸湿。 7

2.5 对抽真空压力的精确控制可确保 工艺条件稳定且良率较高。 7

2.6 实时气体工艺监测可保护 免受灌装过程中任何爆炸性气体混合物的危害。 8

2.7 在化成工艺前对已注液的电池进行测试，以降低 安全风险，避免产能浪费。 8

3. 优化电池电芯生产线末端检测的九条建议 9

3.1 通过持续（正确）检查电芯是否泄漏，可避免容量急剧下降，并延长电池的使用寿命。 9

3.2 直接电解液泄漏检测是唯一可靠的 方法，可检测微米级范围内的泄漏。 10

3.3 软包电池化成后的测试。 10

3.4 以您的生产速度进行测试——周期时间短 11

3.5 批量测试：实现大规模生产中的最高产量 12

3.6 成功的关键在于使用经认证的校准漏孔对泄漏测试仪进行正确的校准。 12

3.7 半固态电芯需要针对更小的漏率进行泄漏测试 12

3.8 更高的灵敏度可实现更快的测试循环 13

3.9 更高的灵敏度可实现更大的测试体积 14

4. 全固态电池生产中实现理想泄漏测试的三个技巧 15

4.1 全固态电池的泄漏测试需要新的测试方法。 15

4.2 H_2S检测并不是一种合适的泄漏测试方法。 16

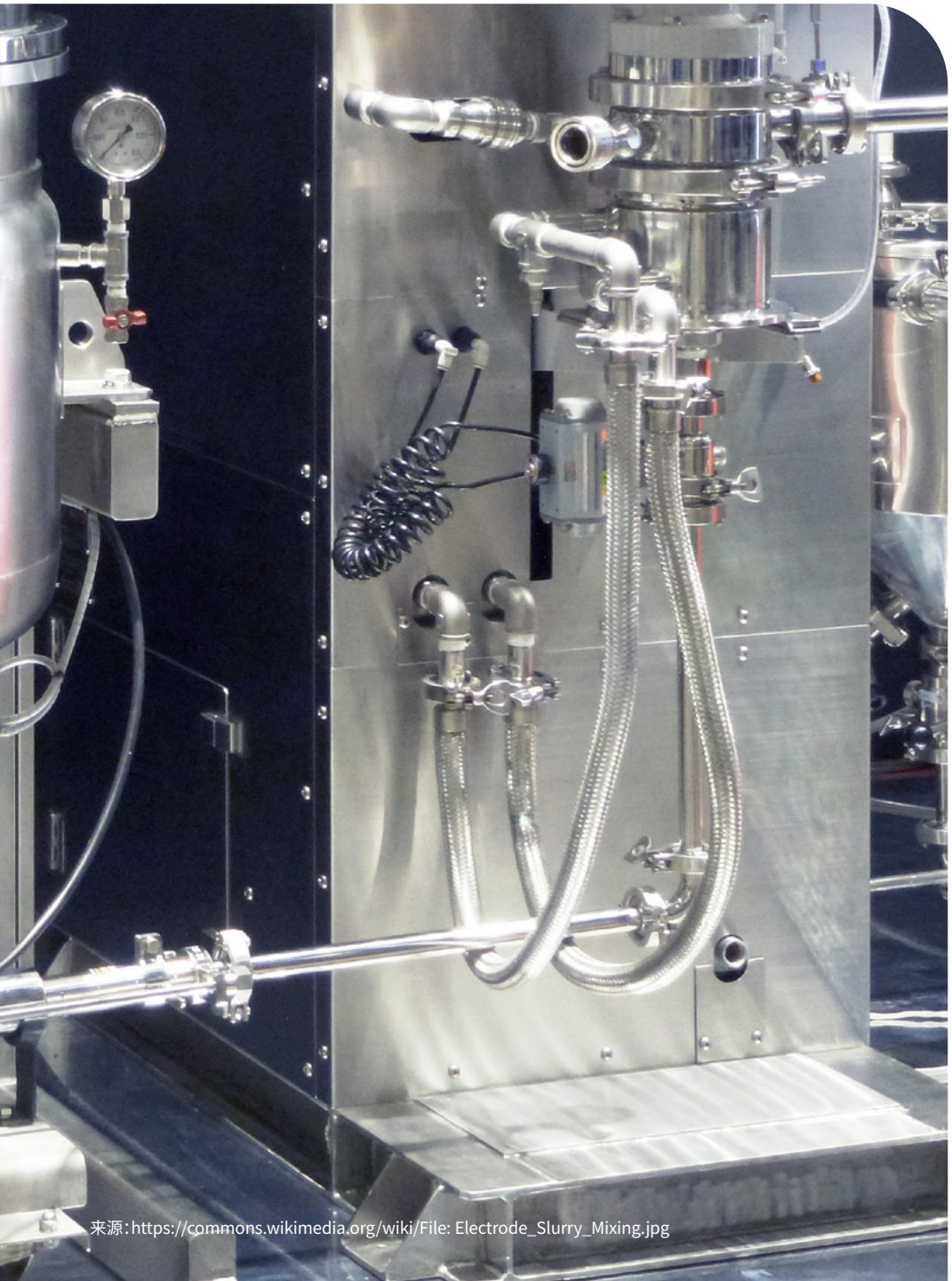
4.3 氦轰击法可可靠地检测全固态电池中的泄漏。 17

5. 附录 19

5.1 法律声明 19

5.2 插图来源 19

5.3 关于 INFICON 19



来源：https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Electrode_Slurry_Mixing.jpg

1. 优化电极生产的四个技巧

在电极制造过程中，从胶体研磨预处理到真空室干燥，有许多流程必须在真空环境下进行。若想确保产品质量始终如一，在电极浆料混合过程中监测空气质量和湿度也至关重要。

然而，并非所有电池制造商都已采取既有效又经济的方式来监测和控制其电极生产。以下四条建议将重点介绍您可以采取哪些措施来显著提升电极生产质量。

1.1 通过精准的工艺监测与控制，防止浆料受到污染。

电极的一致性及电池的质量取决于您在浆料混合过程中对关键工艺变量的控制程度。除了粘度和密度等变量外，监测空气质量也至关重要，因为您需要防止杂质污染电极浆料。

因此，建议在此工艺步骤中使用气体分析仪，不仅监测空气质量，还应监测湿度等其他重要工艺参数。

1.2 在电极烘烤过程中，控制真空度以实现最高工艺效率。

隧道式电极烘烤系统在各个腔室中采用不同的真空度。然而，若要充分发挥系统的产能，必须避免不必要的等待时间，并尽快将电极转移至下一干燥工序。这要求能够快速、准确地检测是否已达到所需的真空度。

皮拉尼真空计提供了一种经济可行的方案，可随时监测干燥过程中所需的各种真空度是否已达到。为了获得更佳的性能，请在烘烤线上使用皮拉尼 CDG 组合真空计。

电容式真空计（CDG）测量的高准确度和快速响应，可显著提高工艺效率，并提供一种经济可行的方法，用于实时监测干燥过程中所需的各种真空度是否已达到。



皮拉尼电容式薄膜规 (PCG55x)

1.3 监测干燥过程中的残留水分，可最佳地确定干燥终点并节约能源。

在阳极生产中，存在一个真空干燥过程，水分会随空气一同被抽走。在此过程中，确保没有残留水分影响结果至关重要。

然而，大多数制造业企业仍未对残留水分进行监测，因此无法可靠地确定干燥过程的终点。但正是在这一点上，持续监测才显得尤为重要。

气体分析仪通过持续的工艺监测和质量控制为干燥过程带来益处，从而可显著节省能源。由于干燥过程能耗极高，能否始终准确确定其终点，还是让真空干燥过程不必要地延长，这将产生显著差异。

1.4 选择真空计，其具备抗常见污染物的特性，从而提高您的生产设备运行时间。

这是不可避免的：电极制造过程会产生杂质，例如来自电极涂层金属粉末的颗粒以及溶剂的脱气。

对于皮拉尼真空计而言，颗粒和溶剂会造成严重问题，且故障并不罕见，例如因灯丝烧断而导致的故障。因此，坚固耐用是您系统中所用真空计的一项重要标准。

在选购真空计时，请选择具有专门防污染侵入保护功能的皮拉尼真空计——这将相应地延长灯丝的使用寿命，并帮助您避免代价高昂的生产中断。

另一道防护措施是可选配的带烧结过滤器的中心环，可安装在真空计与真空系统之间。这是减少金属颗粒侵入并延长皮拉尼真空计使用寿命的另一种方法



皮拉尼标准规 PSG5xx



2. 提升电芯组装质量的七条建议

锂离子电芯必须具备防泄漏性能，才能在长期使用中保持其功能和容量。此外，某些工艺步骤是在不同的真空条件下进行的。对电芯进行真空控制和持续的泄漏测试，可以显著提高您的生产质量和良率。以下七条建议介绍了哪些方法和设备最适合哪些组装步骤。特别值得一提的是，INFICON 开发了一种独特的方法，即使在电池电芯注液后，也能可靠地检测其泄漏情况：即直接电解液泄漏检测方法。

2.1 在灌注电解液前对硬壳电芯进行泄漏检测，即可避免因灌注失败而报废外壳和浪费电解液。

在向固态锂离子电芯注入电解液前对其进行泄漏检测，是避免报废外壳并杜绝电解液浪费的绝佳方法。

对于电池填充前的泄漏测试，建议使用氦气作为测试气体进行真空泄漏测试。操作步骤如下：首先，对组装好的电芯进行抽真空，然后注入氦气。接下来，将电芯放入同样已抽真空的真空室中进行测试。任何泄漏都会导致氦气测试气体逸入真空室。泄漏检测仪会立即检测到逸出的氦气，将其作为泄漏的定量指标，从而在电池生产中实现最高的流量和最长的设备运行时间。



来自锂 离子电池装配线的废弃圆柱电芯。



在真空室中测试硬壳电芯。

2.2 可靠的真空计可提高氦气泄漏测试过程中的可重复性，并确保 设备运行时间最大化。

进行氦气泄漏测试时，需要使用真空室。在测量过程中，真空室内的压力会从大气压降至 0.1 mbar。重要的是，不要让氦气泄漏检测仪暴露在过高的压力下，并严格控制压力条件。皮拉尼真空计或皮拉尼组合真空计非常适合 0.1 mbar 至 1 bar 之间的这一宽广压力范围。

通常，氦气泄漏测试在电芯外壳焊接完成后立即进行。然而，此时电芯内仍残留大量颗粒，这些颗粒很容易污染皮拉尼真空计并导致灯丝烧断。因此，应谨慎选择皮拉尼真空计，特别是应选择带有内部保护腔的型号，以防止颗粒接触灯丝。

此外，建议考虑在真空计与氦气测试腔之间安装带烧结过滤器的可选中心环，以防止颗粒进入高温灯丝。



正在使用的皮拉尼真空计（PSG5xx）或皮拉尼组合真空计（PCG5xx）。

2.3 电芯的全自动干燥过程需要快速、准确的实时压力监测。

在向电芯注入电解液之前，必须清除其中的任何残留水分。为此，需要使用连续干燥炉。干燥炉的不同阶段在不同的真空度下运行。此外，运动部件会导致持续的压力波动。与大气接触以及阀门的精确开启和关闭，取决于高性能真空计的快速、精准控制。为获得最佳效果，请选择皮拉尼-电容组合式真空计（Pirani/CDG），它能在50至1500毫巴范围内提供更快、更精确的压力测量。

基本上，焊接过程中产生的水蒸气和颗粒会导致Pirani传感器故障率升高。专为保护灯丝免受水蒸气和颗粒侵害而设计的Pirani真空计是您的最佳选择。若在真空计与真空系统之间安装带烧结滤芯的中心环，可进一步减少穿透性颗粒的数量，从而延长真空计的使用寿命。

2.4 精确控制灌注系统的压力，使其维持在 范围内，以避免不必要的吸湿。

在灌注过程开始时，电芯会被抽真空至 30 - 63 mbar 的真空度。如果灌注系统存在泄漏，抽真空过程可能会将环境中的水分吸入灌注系统。压力上升是灌注系统正在吸入（潮湿）空气的一个迹象。这就是为什么在此处使用高精度压力表至关重要。若使用电容膜片测量仪进行压力控制，您将始终能够清晰区分真实的压力上升与传感器信号的单纯波动——从而可靠地防止水分侵入。原则上，传统Pirani传感器的准确度为±15%。而电容膜片测量仪的准确度则为±0.2%。电容膜片测量仪中的超纯陶瓷传感器能够抵御电解液溶剂可能造成的腐蚀，其传感器使用寿命远长于普通皮拉尼真空计。

2.5 对抽真空压力的精确控制可确保 工艺条件稳定且良率较高。

在电解液灌注过程中精确控制抽真空压力，可创造可重复性并实现高产率。如果压力过高，电池中仍会残留过多空气，从而妨碍良好灌注。但如果压力过低，电解液中的溶剂将开始蒸发，导致电解液成分发生变化。选择使用 电容薄膜真空计 ，既能提供高准确度，又具有极强的抗性。这确保了压力计传感器的长久使用寿命。



使用中的电容薄膜真空计（SKY® CDG025D）。

2.6 实时气体工艺监测可保护 免受灌装过程中任何爆炸性气体混合物的危害。

电芯是在真空环境下灌注电解液的。然而，这些电解液中含有多种溶剂，当它们蒸发时会产生极具危险性的气体，可能引发爆炸风险。使用气体分析仪对真空环境下的电解液灌注过程进行监测，是确保员工和生产线安全的关键步骤。气体分析仪可提供预测性工艺监测与控制，为灌注过程中潜在的爆炸性气体混合物提供最大程度的防护。



用于过程监控的 INFICON Transpector®气体分析仪。

2.7 在化成工艺前对已注液的电池进行测试，以降低 安全风险，避免产能浪费。

如果您在化成工艺之前就对已注液的电芯进行泄漏测试，将确保只有不泄漏的电芯才能进入形成工艺。这样一来，与化成工艺相关的根本性安全风险便得以降低，您也不再浪费形成产能和精力。此时，值得对已进行过预测试的硬壳电芯进行复测（参见本节中的提示 1），以确保注液口也已正确密封。对于软质可变形软包电芯，现在正是考虑进行泄漏测试的合适时机。

INFICON 开发了一种独特的方法，可对已注液的电芯进行此类泄漏测试。该新方法通过直接检测逸出的电解液来发现泄漏。操作流程如下：将已注液并密封的电芯放入真空室中。当真空室抽真空时，电解液会通过任何泄漏点逸出。在此过程中，电解液中所含的溶剂也会逸出；它在真空环境中蒸发，并被高灵敏度传感器检测到。借助 INFICON 的这种直接电解液泄漏检测方法，您可以检测到微米级别的泄漏。



锂离子电池起火损坏。



使用INFICON独特的直接电解液泄漏检测方法对灌注后的电芯进行测试。红灯亮起表示已检测到泄漏。

针对研发或中试阶段柔软、敏感的软包电池的泄漏测试，提供了一种特殊的柔性测试腔，可在真空环境下进行无损检测。软包电池被放置在两层膜之间，这两层膜能贴合电池形状，并防止电池膨胀。

对于批量生产测试，还应使用定制测试腔室，以实现多颗电池的同步测试。



3. 优化电池电芯生产线末端检测的九条建议

在锂离子电芯的生产过程中，生产线末端的电解液泄漏检测是质量控制的最后也是至关重要的一步，旨在确保电芯在未来多年内不会受潮。除其他内容外，以下六条建议将说明为何独特的“直接电解液泄漏检测”方法在可靠性和准确度方面均优于过压法或氦轰击法等传统方法。

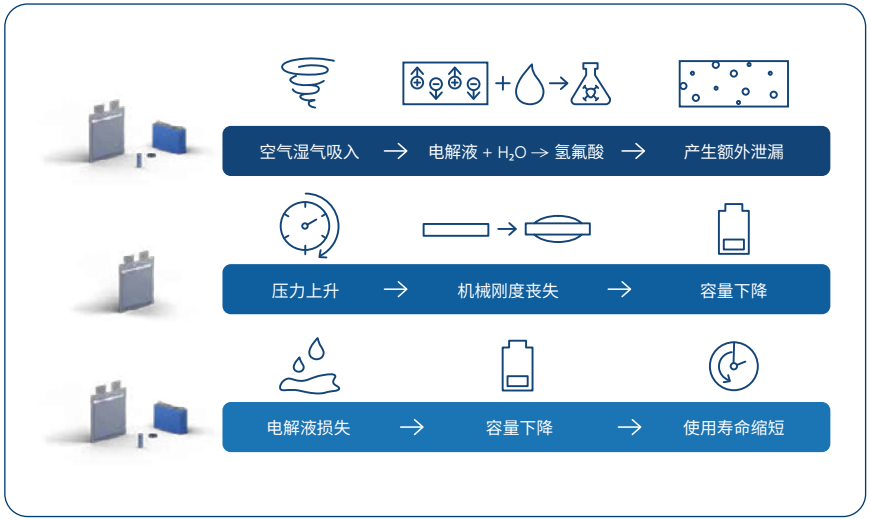
该方法通过同时测试多个电芯，能够达到与批量生产相同的测试速度，从而确保每颗制造出的电芯（无论其设计如何）都能通过质量保证。

3.1 通过持续（正确）检查电芯是否泄漏，可避免容量急剧下降，并延长电池的使用寿命。

对于所有锂离子电芯设计——无论是圆柱电芯、棱柱形电池、纽扣电池还是软包电池——防止电解液流失以避免容量随时间推移而降低都至关重要。

消除任何水分的吸收可能更为关键。特别是，在负压（加压）下密封的电芯可能会通过泄漏吸入潮湿的空气。空气中的水分与电芯中的电解液发生反应，形成氢氟酸，从而腐蚀电芯并导致进一步泄漏。

因此，即使是最微小的缺陷也会迅速扩大，这也解释了为何在电芯生产中，可靠的线末端测试如此重要。



锂离子电池芯的三种失效模式。

3.2 直接电解液泄漏检测是唯一可靠的 方法，可检测微米级范围内的泄漏。

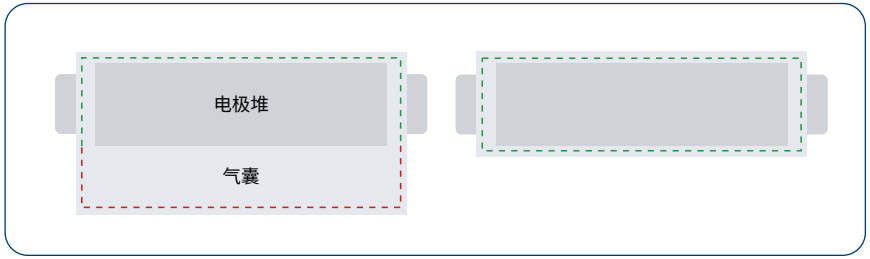
如果锂离子电池存在微米级别的微小泄漏，这些泄漏会被液态电解液本身堵塞——因此空气无法渗透。电解液仍能堵塞的泄漏最大尺寸取决于电解液的具体性质以及电池内部的压力条件。压力测试方法，甚至氦轰击法后进行真空泄漏测试，乍看之下似乎是颇具吸引力的解决方案。遗憾的是，这些方法都没有能力检测到达到阻塞极限的泄漏。这是因为这些微米级泄漏对应的气体泄漏率在 10^{-6} mbar•l/s 范围内，而压力测试在最佳情况下也仅能检测到 10^{-6} mbar•l/s 范围内的泄漏。

在氦轰击法中，被测部件首先被置于高压氦气环境中。如果被测部件存在泄漏，氦气就会渗入其内部。在随后的真空测试中，这些氦气会再次逸出，被检测到并成为泄漏的证据。氦轰击法是一种经过验证的用于检测气密部件气体泄漏的方法，例如，它被广泛用于安全气囊点火器的泄漏测试。但该方法完全不适用于充满液体的被测部件——如我们的电芯场景。通过泄漏点渗入的氦气会在电芯内部上升，如同气泡在气泡水中上升一般。这会阻止氦气在真空测试期间再次逸出。即使所有液体都已渗入电芯堆栈，也极有可能在灌注过程中，液态电解液已润湿了任何微小泄漏点，导致这些泄漏点目前被堵塞，但随后会因干燥而重新暴露。

INFICON 开发的“直接电解液泄漏检测”方法，是首项用于检测预填充锂离子电芯泄漏的方法。与“充气法”先用氦气对电池加压不同，该方法采用真空测试直接检测泄漏的电解液：以溶剂形式逸出并在真空腔内蒸发。这种新方法还可用于检测预填充锂离子电芯中微米级别的泄漏——最高可达 10^{-6}mbar•l/s 范围内的规定气体泄漏率。

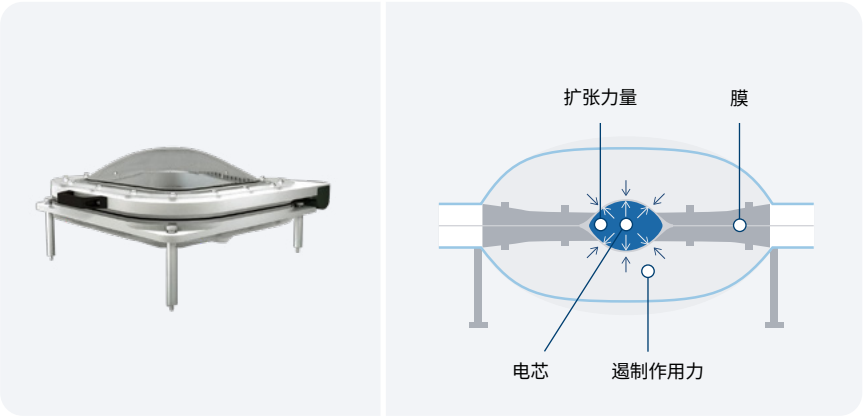
3.3 软包电池化成后的测试。

软包电芯在真空环境下进行密封。化成过程中，电芯内部会产生气体。这些气体聚集在与电芯相连的气囊中。形成完成后，多余的气体被排出，气囊被切断，电芯最终完成密封。确保最终密封严密性的唯一方法是在形成后进行泄漏测试。此外，由于仅是搬运软包电池就可能导致泄漏，因此在制造业过程结束时进行泄漏测试至关重要。



软包电芯化成前（左）与化成后（右）。

在不损坏软包电池的情况下对其进行测试颇具挑战性，因为在常规真空腔中，软包电池会膨胀，从而对其密封处造成应力。针对研发和试生产测试，INFICON 开发了一款专用于其独特“直接电解液泄漏检测”工艺的专用测试腔。该柔性测试腔由两层柔性材料构成，可在测试过程中支撑软包电池，并防止其膨胀。对于软包电池的批量生产和测试，可使用配备专用固定架的更大测试腔，该固定架同样能支撑软包电池并防止其膨胀。

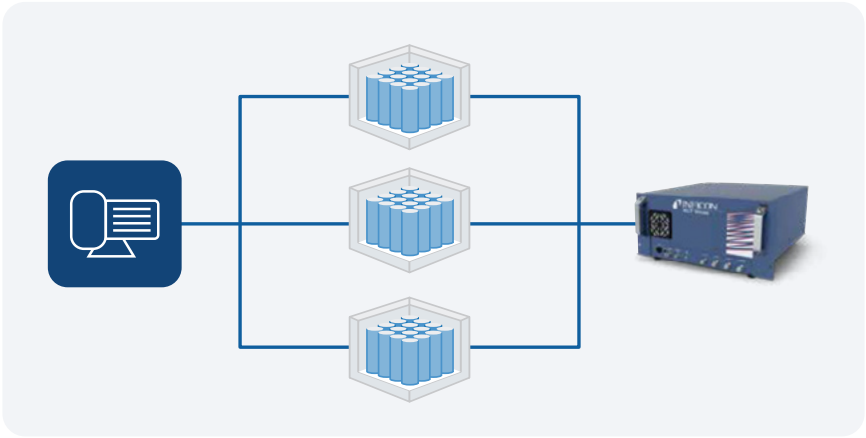


INFICON FTC3OOO柔性测试腔即使针对软包电池，也能在真空环境下实现无损检测。

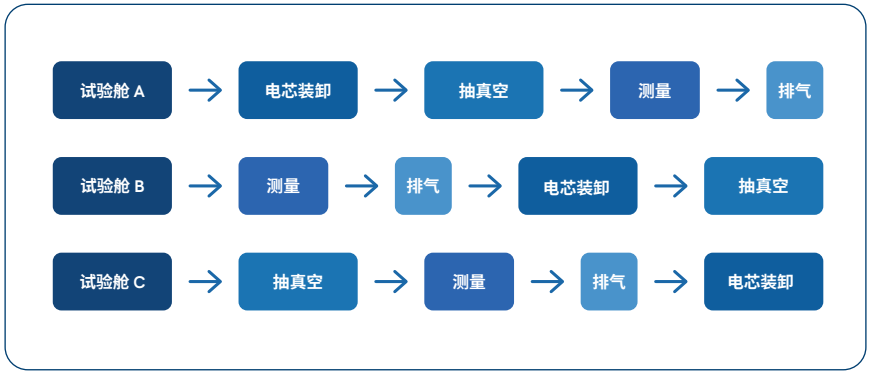
3.4 以您的生产速度进行测试——周期时间短

为了确保批量生产中的质量，应实施对所有电芯的 100% 在线测试。自动泄漏测试站必须与您的生产节奏保持同步。您可以采取多项措施来优化直接电解液泄漏检测的循环时间。其中一个关键因素是选择真空室——其死体积（腔室容积与被测部件体积之差）应尽可能小，以最大限度地缩短抽真空时间。使用特别强大的外部真空泵也能显著加快抽真空速度并缩短循环时间。

您还可以在测试循环开始前清除电芯上的电解液残留物，例如通过激光清洗。将多个真空室连接到泄漏测试仪上，也能显著缩短循环时间。在多腔室测试站中，诸如充气或抽真空等工艺步骤不再导致等待时间，因此您的电解液泄漏检测仪几乎始终处于测量模式。



多腔室测试站



使用 INFICON 的 ELT3000 PLUS 进行工业电解液泄漏检测的典型循环时间。

3.5 批量测试：实现大规模生产中的最高产量

在需要高流量的批量生产中，批量测试最为经济。通过批量泄漏测试，您可以在一个测试循环内测试更多数量的电芯。因此，每个电芯的实际测试时间将缩短至极短。请合理设定批次规模，确保大多数被测批次无泄漏，且仅有极少数批次包含泄漏电池。

毕竟，如果某个批次中检测到泄漏，则需要在下游泄漏测试站（该站也可实现自动化）进行进一步测试。

在复测过程中，将批次规模减半，直至定位出泄漏电芯。举两个例子：对于16个电芯的批次，这需要额外进行四次测试步骤；对于64个电芯的批次，则需要六次。哪种批次规模最适合您的情况，取决于您生产中的典型缺陷率。

毕竟，在批量测试中，所需的总测试次数自然应尽可能少。



ELT Vmax 电解液检漏仪。

3.6 成功的关键在于使用经认证的校准漏孔对泄漏测试仪进行正确的校准。

定期校准测试设备是确保读数准确、测试始终可靠的唯一途径。然而，标准件不能替代校准漏孔。这是因为标准件的漏率可能随时间推移而变得不稳定。此外，标准件的漏率无法获得认证。

而校准漏孔则附带一份证书，其中注明了校准漏孔的漏率，并可追溯至国家标准。这是满足 ISO 9001 要求的唯一途径。



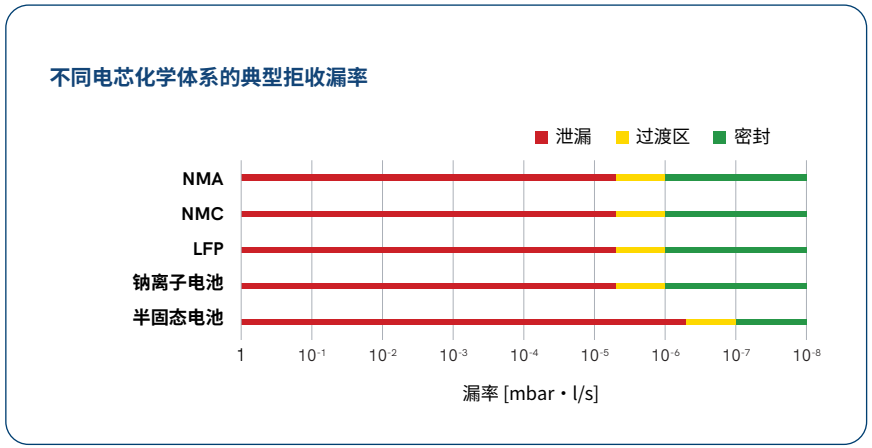
使用经认证的 E-check 漏孔对 ELT 电池检漏仪系列进行校准。

3.7 半固态电芯需要针对更小的漏率进行泄漏测试

半固态电池将传统锂离子或钠离子电池中的液体电解质替换为凝胶状电解质。这改变了电池的能量密度和热行为，但并未改变其基本要求：电池在整个使用寿命期间仍必须保持密封，以限制电解液流失和容量衰减。真正发生变化的是泄漏的物理行为。凝胶状电解液通过泄漏点逸出的速度比液体电解液更慢，这直接影响泄漏检测装置的灵敏度、循环时间以及腔室设计。

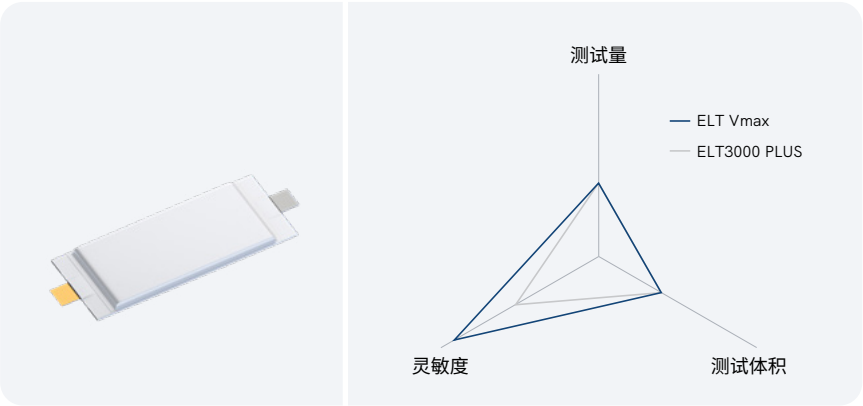
半固态锂离子电池的显著特点在于其电解质：采用凝胶而非液体。由于在真空室中，凝胶通过泄漏点逸出的速度比液体更慢，因此电解液泄漏检测方法所需的灵敏度必须高于液体电解质电池的严格要求，才能在正常生产周期内识别出关键泄漏。

虽然NMC、NMA以及钠离子电池通常按照$1 \cdot 10^{-6}$ mbar l/s至$5 \cdot 10^{-6}$mbar·l/s的氦当量泄漏率进行测试，但半固态电池的拒收漏率要求则低至$1 \cdot 10^{-7}$mbar·l/s至$5 \cdot 10^{-7}$mbar·l/s（均以氦当量泄漏率表示）。



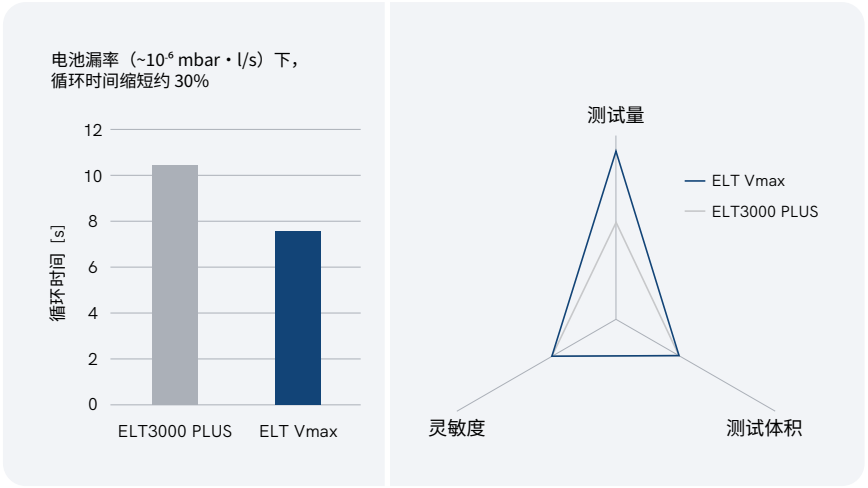
不同电芯化学体系的泄漏测试阈值比较。

直接电解液泄漏检测——其中蒸发的电解液溶剂本身充当示踪气体——是一种能够提供这种余量的方法。其最新一代的ELT Vmax 可达到5・10^{-8} mbar・l/s的漏率界限，非常适合测试这些更小的泄漏率。

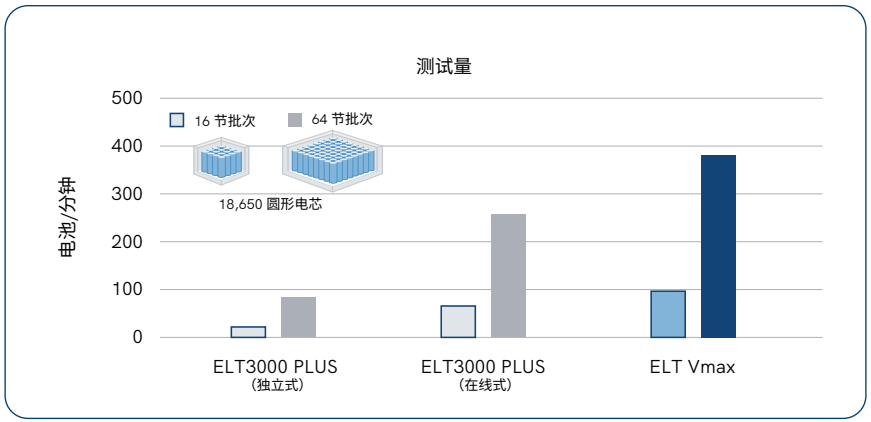


3.8 更高的灵敏度可实现更快的测试循环

一种灵敏度远超所需检测极限的泄漏测试方法，可以在测量早期外推信号上升，从而在不降低检测可靠性的前提下缩短测试周期——前提是所使用的检漏仪在多次测量之间具有出色的可重复性。

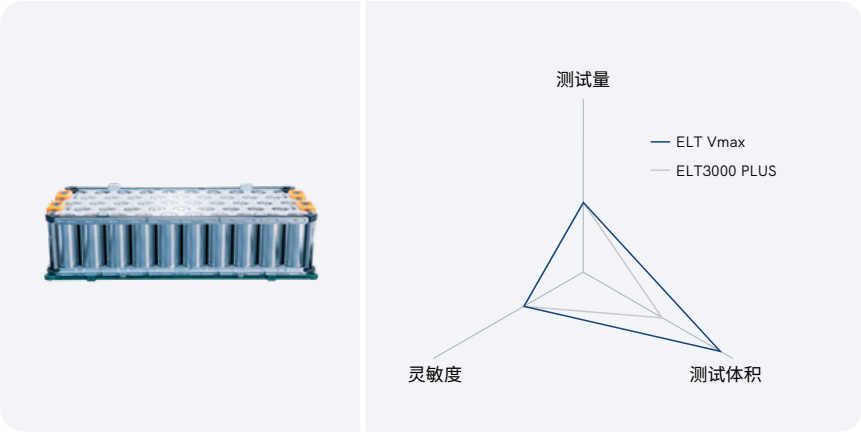


示例：在典型电芯漏率下测得的，两代直接电解液泄漏测试仪之间的循环时间缩短情况。



3.9 更高的灵敏度可实现更大的测试体积

真空测试所能分辨的最小漏率取决于测试腔的死体积：测试件周围的自由体积越大，可检测到的最小漏率就越高。因此，灵敏度更高的检漏仪可以使用死体积更大的测试腔，仍能达到电芯规定的约 10^{-6}mbar·l/s 的漏率。对于特别大的电芯、大批量电芯的测试，甚至整组电池模块的测试，则需要更大的测试腔。



电池模块的新进展：在模块级别进行汇流排焊接后的泄漏测试

这一点至关重要，因为模块内的电池通过汇流条并联或串联连接，而汇流条焊接在每节电池的接触件上。该焊接步骤存在损坏电池外壳的风险，特别是对于软包电池而言，且在模块组装完成后检测此类损坏通常并非标准做法。随着软包电池进入量产阶段，模块级泄漏测试是验证组装过程在发货前未损害电池完整性的一种方式。



示例流程图展示了可在汇流排焊接后的组件级阶段添加泄漏测试的位置。



4. 全固态电池生产中实现理想泄漏测试的三个技巧

全固态电池（ASSB）用固态离子导体（通常是硫化物基、氧化物基或聚合物基材料）取代了传统锂离子电池和半固态电池中的液体或凝胶电解液。

这一变革影响了能量密度、热行为以及与电解液泄漏相关的失效模式，并吸引了整个行业的大量研发投入。它同时也改变了这些电池中电解液泄漏检测的含义：针对液态和凝胶电解液电池建立的方法依赖于检测逸出的液体或蒸汽，而全固态电芯中既不含液体也不含蒸汽。

以下三点要点阐述了为何现有的泄漏测试方法无法直接应用于全固态电池，探讨了一种常见的替代方案，并介绍了目前用于此目的的一种方法。

4.1 全固态电池的泄漏测试需要新的测试方法。

在传统的锂离子或半固态电池中，外壳的缺陷最终会导致液体电解质或其溶剂逸出，并在周围的真空环境中蒸发——这正是直接电解液泄漏检测的物理基础。

全固态电池中不含会以这种方式脱气的液体电解质或溶剂：其离子导体为固体。因此，全固态电池外壳中的缺陷不会产生可供质谱仪检测的蒸汽信号，而直接电解液泄漏检测——尽管对于液体和凝胶电解质电池而言非常可靠——并不适用于这种电池结构。

	液态/凝胶电解液电池	全固态电池
电解液状态	液体或凝胶	固体离子导体
在外壳缺陷处的表现	潮湿空气进入电池（形成HF）	湿空气进入电池（对于硫化物基体系，会形成H_2S）
	溶剂蒸气逸出并在真空环境中蒸发	没有液体或蒸汽可逸出
可直接进行电解液泄漏检测吗？	是——可检测蒸发的溶剂	否——不会产生溶剂蒸气

直接电解液泄漏检测依赖于能在真空环境下脱气的溶剂。全固态电池中并不含有此类溶剂。

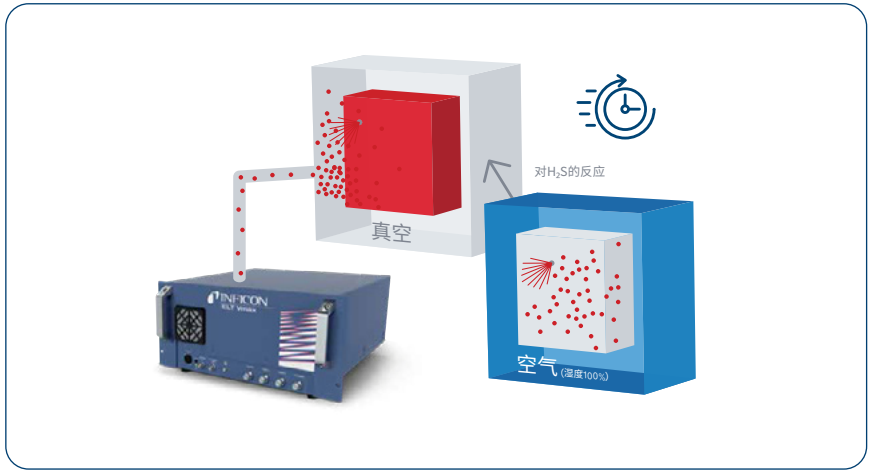
但这并不意味着密封性不重要。硫化物基固态电解质——在当前固态电解质候选材料中具有最高离子电导率，且是汽车应用领域的领先选择——对湿度极为敏感。即使通过微小的缺陷渗入的湿度，也会与硫化物材料发生反应，从而降低离子电导率，并在电池内部产生硫化氢（H_2S）气体。即使通过了目视检查和初步电气测试，电池仍可能存在缺陷，这些缺陷会在后期缩短其服务寿命或引发安全隐患。

因此，一种适用于量产的 ASSB 泄漏测试需要采用一种不依赖于电池内部已存在的液体或蒸汽的检测原理。

4.2 H_2S检测并不是一种合适的泄漏测试方法。

有人提出的一种方法利用了导致缺陷电池性能下降的同一湿气-硫化物反应：将密封的电池置于加压的加湿空气中（例如，约 5 巴，持续 30 分钟），让通过缺陷进入的湿气与硫化物电解液发生反应并形成H_2S，然后在真空下测试是否有H_2S从电池中逸出。

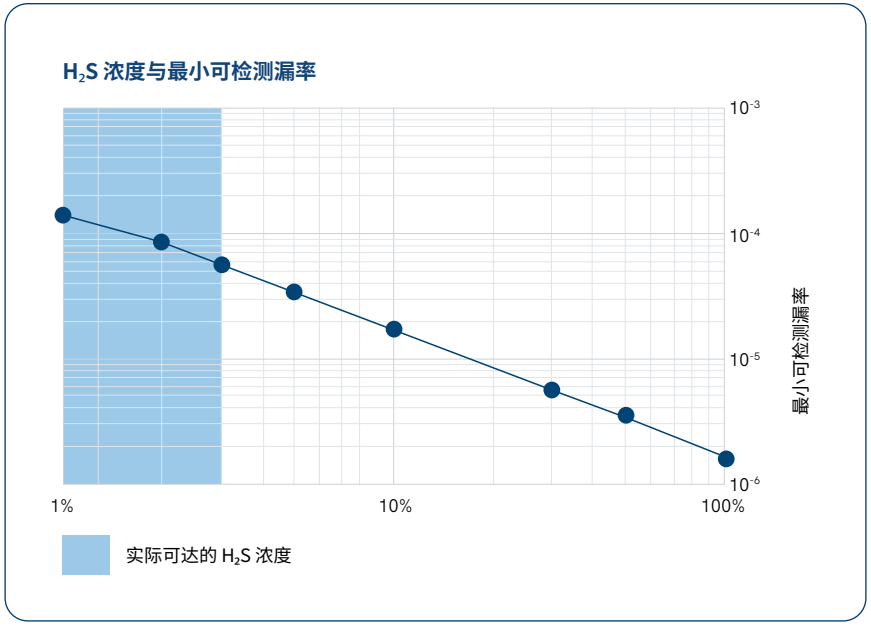
该方法将失效机制本身作为检测信号。实际上，有几个因素限制了其作为生产质量门槛的使用。



湿度冲击及后续H_2S检测

在质谱仪中，H_2S会在34的质数处产生信号，该信号与氧气的信号重叠——空气中氧气的浓度约为21%，且会作为残留本底存在于部件表面和测试腔内。这将H_2S的最小可检测泄漏率限制在约$2\cdot10^{-6}$ mbar•l/s，且仅当从电池中逸出的气体为100%H_2S时才成立。实际上，在充气测试过程中，缺陷测试单元内可积累的H_2S浓度受空气中水分含量（20°C时约为2%）以及水与硫化物反应的动力学限制；已发表的研究表明，测试单元顶部空间中实际的H_2S浓度约为1%–5%。

在这些浓度下，最小可检测漏率仅为 3×10^{-5} 至 1.7×10^{-4}mbar•l/s 左右——远低于 ASSB 泄漏测试一般规定的 10^{-6}mbar•l/s 低灵敏度要求。



最小可检测漏率与电池顶部空间中H_2S浓度的关系。实际的充气条件（1–5%）远低于典型的 ASSB 灵敏度要求。

泄漏量本身进一步缩小了可用范围。极微小的泄漏（约$1\cdot10^{-6}$ mbar•l/s）产生的平衡H_2S浓度仅为几ppm——过低，无法与空气本底浓度区分开来。另一方面，大泄漏（$1\cdot10^{-4}$mbar•l/s及以上）会迅速排空电池较小的内部容量，导致在测量阶段开始前硫化氢已全部逸出，从而可能完全漏检该缺陷。只有中等规模泄漏中相对狭窄的范围才处于可行的检测窗口内。

加湿过程中产生的H_2S浓度还取决于加湿持续时间、温度和压力，以及暴露于湿气的电解液表面积和电池内部容量——这些因素会因电极表面粗糙度、孔隙率和电池设计而异，且在不同电池之间无法严格控制。因此，同一物理

缺陷在不同的测试循环中可能会产生不同的读数，这限制了其作为可重复质量门槛的实用性。

湿度冲击测试还会向生产环境中引入水分，这与 ASSB 制造业一般要求的湿度控制相悖；此外，H_2S本身具有毒性——其即时危险浓度约为 50 ppm——这增加了安全和法规方面的考量。该方法仅适用于硫化物基电解液；对于氧化物或聚合物基全固态电池（ASSB）电化学体系，它无法提供检测机制。

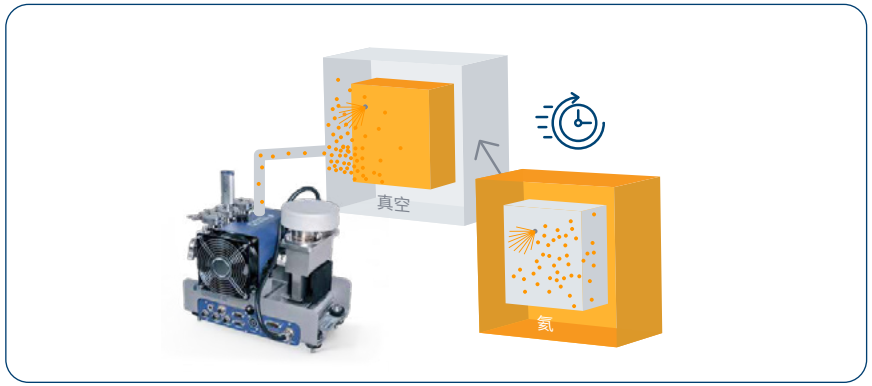
4.3 氦轰击法可可靠地检测全固态电池中的泄漏。

氦轰击法的操作流程与硫化氢充入法类似——将电池置于压力容器中，在高压下暴露于示踪气体（通常为氦气）中一段时间，随后转移至真空室进行检测——但示踪气体由外部供应，而非由电池内部反应产生。

氦气作为最轻的惰性气体，在充氦过程中会渗入缺陷并积聚在电池内部；随后，氦气专用质谱仪会测量真空条件下逸出的氦气量。由于该方法不依赖电池内部的任何液体、蒸汽或活性物质，因此其适用性并不取决于全固态电池（ASSB）采用的是硫化物基、氧化物基还是聚合物基固态电解质。

这并非一种新方法或未经证实的方法：几十年来，氦轰击法一直被用于测试其他对泄漏容忍度极低、且对安全至关重要的密封组件，包括汽车安全气囊气体发生器和点火器。

将这一成熟且特性明确的方法应用于 ASSB 电池，可避免依赖诸如硫化氢（H_2S）生成等检测原理——该原理在此特定应用中的行为仍难以控制。

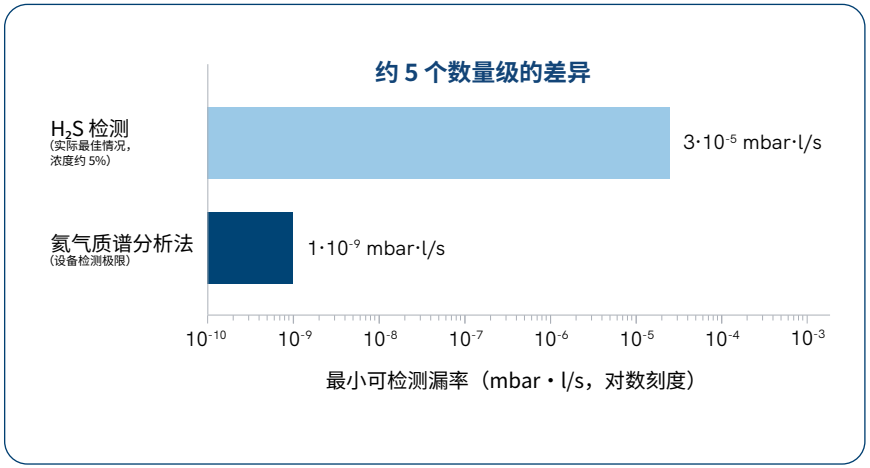


氦轰击法及随后氦气泄漏监测

缺陷电池在氦轰击法过程中吸收的氦气量遵循已知的物理定律——亨利定律和菲克扩散定律——因此，对于给定的缺陷尺寸、轰击压力和持续时间，电池内部产生的氦气浓度在不同电池之间是一致的。这使得氦轰击法具有硫化氢轰击所缺乏的可重复性：相同的缺陷在重复测试中会产生基本相同的信号。其灵敏度也显著更高，部分原因在于氦气在空气中的天然本底浓度非常低（约 5 ppm），这与氧气不同。

质谱氦气检测仪的分辨能力比H_2S检测高出几个数量级；目前已有标称灵敏度低至 $1 \cdot 10^{-9}$ mbar•l/s 的设备，这意味着即使在充氦后测试腔内的氦填充率仅为 1%，仍可对应约 $1 \cdot 10^{-7}$ mbar•l/s 的可检测漏率。

更高的设备灵敏度还允许缩短充氦时间，因为产生可测信号所需的氦气积累量更少。



据报道，在实际充气条件下，H_2S检测与氦气质谱分析法在可实现的灵敏度方面存在数量级的差异。

与任何充气检测方法一样，由于 ASSB 测试室的内部容量较小，因此一个足够大的缺陷就可能迅速排空积累的示踪气体，这可能发生在腔室抽真空期间以及测量阶段启动之前。

需要设置充气压力、充气持续时间和抽真空时机等工艺参数，以确保细微和明显的缺陷都能被检测到；这一限制对氦轰击法和H_2S充气同样适用。

由于氦气化学惰性、无毒且易燃，因此也避免了将H_2S作为工艺气体处理时所涉及的安全和监管负担。

作为目前可用的设备示例，INFICON 提供了可集成到自动化 ASSB 生产线的**LDS3000** 氦气泄漏检测仪，以及适用于中试生产线和研发用途的移动式**UL3000** ；其他制造商也提供基于类似工作原理的氦气泄漏检测仪。

5. 附录

5.1 法律声明

由科隆 INFICON GmbH 发布

注：本白皮书中包含的所有指向外部网站的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

5.2 插图来源

第 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19 页的产品图片、插图及图像：INFICON HOLDING AG

封面图片以及第 6, 8, 9, 13, 14, 15 页数的图片（AI 生成），19：Shutterstock

5.3 关于 INFICON

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、流程及整个工厂的生产效率和质量。这些分析、测量和控制产品对于空调/制冷以及汽车制造业领域的气体泄漏检测至关重要——包括本白皮书中所述的锂离子电池和下一代电池单元的泄漏测试。在半导体以及光学、平板显示器、太阳能电池和工业真空镀膜应用的薄膜涂层等复杂制造过程中，这些产品对设备制造商和终端用户而言也至关重要。

真空工艺的其他应用领域包括生命科学、科研、航空航天、包装、热处理、激光切割以及许多其他工业过程。INFICON 还利用其在真空技术方面的专业知识，为应急响应、安全和环境监测提供独特的毒性化学品分析产品。

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（IFCN）在瑞士证券交易所（SIX Swiss Exchange）上市。







请与我们联系！

如果您想了解更多如何显著提升电池产量的信息，欢迎随时联系我们。无论您是希望更好地控制关键生产环节、实现最佳的生产管控，还是计划开展一项重大的智能制造业项目，我们都乐意为您提供支持。

联系我们



INFICON

reach.china@inficon.com | www.inficon.com/contact | 服务热线：**400 800 6826**

鉴于我们持续进行的产品改进计划，规格如有变更，恕不另行通知。
©2026 INFICON