



电子书

电动交通：

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测



纯电动汽车/插电式混合动力汽车/燃料电池汽车工业生产 ——
动力电池、电机和燃料电池生产中的检测任务

目录

前言.....	4
简介.....	5
1 电动交通是未来的大势所趋	7
2 纯电动汽车/插电式混合动力汽车的“心脏”：动力电池.....	8
2.1 从电芯到电池模组和电池包再到动力电池	8
2.2 火灾风险和热失控	9
2.3 电芯进货检测.....	11
2.4 电池模组和电池包的密封性.....	11
2.5 确保电池使用寿命	12
3 电芯检测方法.....	12
3.1 不同类型电芯的失效模式.....	13
3.2 不同类型电芯的漏率要求.....	14
3.2.1 硬壳电芯 (方形、纽扣和圆柱形电芯) 的要求漏率.....	14
3.2.2 软包电芯的要求漏率.....	15
3.3 电芯壳体初步检测	16
3.4 预充注电芯的泄漏检测	18
3.4.1 直接使用电解液溶剂进行泄漏检测	18
3.4.2 直接检测法优于加压法和氦轰击法	20
4 对电池包壳体的要求.....	21
技术点1：IP67 —— 壳体材料决定漏率限值	22
4.1 在真空室或累积室中对壳体进行初步检测	26
4.2 自动化机器人吸枪检漏	27
技术点2：为什么高气体流量在机器人吸枪检漏中至关重要.....	30
4.3 使用合成气体进行手动吸枪检漏	32

5	冷却部件的密封性	32
5.1	乙二醇-水冷却液或制冷剂	32
5.2	冷却回路部件的防漏要求	33
5.3	在安装电池期间进行吸枪检漏	34
6	燃料电池电动汽车 (FCEV) 及其部件	35
6.1	燃料电池的双极板	36
6.2	双极板的制冷剂回路	38
6.3	双极板氢泄漏检测	39
6.4	成品燃料电池堆的生产线末端检测	40
7	储氢罐和氢管路	40
7.1	标准和渗透限值	40
7.2	漏率基于渗透率	42
7.3	储氢罐累积检测	42
7.4	储氢罐真空检测	43
7.5	配备所有配件的成品储氢罐的吸枪检漏	43
8	电气部件和电子部件	45
8.1	传感器和控制模块	46
8.2	电驱动电机	46
8.3	电机壳体真空或累积检测	47
8.4	水冷夹套泄漏检测	48
9	关于INFICON	49
10	有关汽车部件泄漏检测的其他信息来源	50
10.1	有关具体泄漏检测任务的文件系列	50
10.2	到INFICON学院进修	51
11	联系方式	52
	法律声明	53

前言

电驱动装置及其单个部件的泄漏检测要求像产品本身一样复杂。关键部件包括电池(注有电解液)、介质回路(含有水-乙二醇或氢)以及电气部件(带有高电压/电流)。这些部件对制造过程中的质量保证提出了最高要求，因此也对泄漏检测提出了最高要求。

在 Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH，多年来，我们一直从事高精度泄漏检测技术的研究。一项重要发现是，热力学物理原理和模拟等理论思考是选择适当检测方法的初始方向。然而最终，这是不够的。例如，简单地回答液体开始泄漏时的漏孔尺寸的问题绝非无关紧要。材料和漏孔的几何形状以及热力学边界条件(例如温度、压力和粘度)在其中都发挥着重要的作用。

除了检测所用的实际漏率限值(无论该限值由相关标准还是产品质量的其他考虑因素规定)之外，还必须选择正确的检测方法。同样地，必须始终对泄漏检测的成本进行评估。开始时，通常采用简单而低成本的基于压缩空气的泄漏检测方法，例如压力衰减法或质量流量法。然而，本文明确指出——我只能根据自己的经验证实这一点——要达到检测所用的泄漏限值往往需要进行示踪气体分析。通过本文介绍的新型检测技术，可以找到经济的解决方案，尤其适合对生产周期和加工能力有相应要求的工业生产。

除了在泄漏检测中实际遇到的一般挑战之外，本电子书还将介绍各种检测技术和重要的经验示例，并使读者很好地了解非传统驱动装置领域。

Alexander Stratmann，工程学博士 / 物理学硕士

斯图加特，2021年3月，Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH

简介

泄漏检测：动力电池和燃料电池生产中的必要环节

年复一年，电动交通变得越来越重要。随着纯电动汽车和插电式混合动力汽车数量的增长，动力电池的需求量也在增长。确保其质量成为汽车制造商和供应商的核心任务。燃料电池电动汽车 (FCEV) 也需要通过电池来为驱动汽车的电机供电 —— 虽然这类电池的容量明显更低。无论如何，都必须对燃料电池电动汽车的储氢罐和燃料电池进行严格的泄漏检测。

在动力电池的生产过程中，对所有相关部件进行一致的泄漏检测至关重要。这是因为，在这个非传统零排放驱动的时代，消费者既不希望自己的汽车起火，也不希望几年后就要再花一大笔钱购买新电池才能重新获得必要的容量和可接

受的续航里程。对于动力电池，在生产 的每个阶段都务必确保电芯中的电解液 无论如何都不会漏出，也不会接触到水， 甚至不会接触到空气中的湿气 —— 这是 因为存在水与电芯的电解液反应生成氢 氟酸的风险。此外，由于短路风险，水 也不得从外面进入电池模组或电池包。 由于电池永远不应过热，因此，动力电 池的冷却回路还必须防漏并能防止冷却 介质损失。

动力电池既是潜在的危险源，又是对纯 电动汽车 / 插电式混合动力汽车的成功至 关重要的易损件。在燃料电池电动汽车 的氢技术领域，安全性和密封性在任何 情况下都是必不可少的。想要长期满足 客户需求的任何非传统驱动装置制造商 都不可避免地要在制造过程中使用适当 的泄漏检测方法。质量保证至关重要。



混合动力汽车中的锂离子电池。

电子书

电动交通：

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测



丰田燃料电池汽车。

本白皮书将详细概述相关要求及其处于制造纯电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池电动汽车的工业生产中的哪个阶段，以及适合具体应用的有哪些泄

漏检测方法。一项发现是：只有现代化的示踪气体法能够确保非传统驱动部件所需的气密性。

1 电动交通是未来的大势所趋

2019 年创造了一项新纪录：纯电动汽车和插电式混合动力汽车的全球销量高达 210 多万辆，比上一次创造新纪录的 2018 年增加了 40%。这些数据来自国际能源署 (IEA) 发布的报告《全球电动汽车展望 2020》，IEA 是经济合作与发展组织 (OECD) 的下属机构，总部位于巴黎。迈向零排放交通的目标不仅是当下所需，而且得到大力支持，特别是在政治层面，同时受到官方气候目标与明确配额政策两方面因素的推进。另一方面，以中国为例，2019 年几乎将对购车者的补贴减半——即使没有高额补贴，电动汽车在中国也逐渐得到认可。全球所有纯电动汽车 / 插电式混合动力汽车约 47% 都在中国，紧随其后的是欧洲和美国等市场。尽管 2019 年全球乘用车市场整体疲软，电动汽车却出现了明显增长。以中国为例，纯电动汽车 / 插电式混合动力汽车在 2019 年就已占有乘用车登记量的 4.9%，但在欧洲，其市场份额只有 3.5%。2020 年出现的数据也反映了类似的情况。尽管新冠疫情使全球乘用车经济的发展速度放缓，纯电动汽车 / 插电式混合动力汽车却仍能保持没有增长但至少稳定的销售数据。

美国汽车制造商也在推动电动汽车市场的增长。除了在纯电动汽车和插电式混合动力汽车的产能方面进行投资之外，锂离子电池的内部生产也发挥着越来越重要的作用。例如，通用汽车与韩国 LG Chem 的合资企业 Ultium Cells 目前正在美国俄亥俄州的洛兹敦建设锂离子电池制造厂。这家企业位于田纳西州斯普林希尔的工厂是通用汽车为生产电动汽车而设立的第三家工厂。甚至福特的新任首席执行官 Jim Farley 都公开表示考虑建立自己的电池制造厂，以便能够更灵活地应对福特快速增长的产量。目前，像特斯拉这样的纯电动汽车先驱已经依赖于自己的电池生产有一段时间了——尽管位于内华达州斯帕克斯附近的特斯拉 1 号超级工厂 (Gigafactory 1) 目前仅达到其最终计划产能的 30%。

为新技术铺平道路的另一趋势是电池容量的价格不断下降。目前，1 千瓦时电池容量的价格仅为 156 美元，而 2010 年时还需 1100 美元。与此同时，纯电动汽车和插电式混合动力汽车上所安装电池的总容量也在增加。尽管所有轻型电动商用车的平均电池容量在 2018 年还只有 37 千瓦时，目前却已经达到 44 千瓦时。如今，在大多数市场中，纯电池驱

动乘用车的电池容量已在 50 至 70 千瓦时的范围内，这有助于实现相应的续航里程。

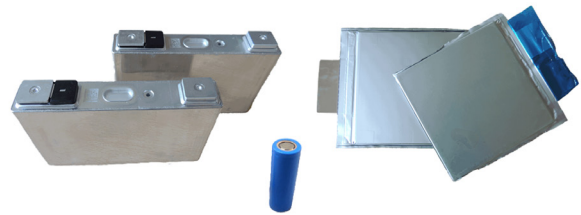
与纯电池驱动同时回到议程上的还有燃料电池这一话题。燃料电池电动汽车必不可少的能量存储系统是储氢罐。在燃料电池中，携带的氢与大气氧反应生成水。一个体积相对较小的动力电池储存由此产生的电能，并为驱动车辆的电机供电。尽管燃料电池电动汽车的能量成本更高，但与纯电动汽车相比，还具有续航里程更长以及补充燃料停车时间更短等优势。这使燃料电池技术成为一项对大型乘用车和商用车有吸引力的无二氧化碳排放驱动替代方案。

目前，包括本田、现代和丰田在内的许多亚洲汽车制造商都对这项技术的未来充满信心，纷纷推出燃料电池电动乘用车。例如，丰田已经推出的新一代 Mirai 车型自 2021 年起将年产 3 万辆——将目前的产能提高了 10 倍。供应商罗伯特·博世也在其德国萨尔州洪堡工厂制造燃料电池部件，并计划在 2022 年前将一种新型“博世电池堆”推向市场，尤其用于为重型车和商用车提供动力。博世预测，到 2030 年，全球所有电动汽车将有高达 20% 通过燃料电池产生驱动力。

2 纯电动汽车 / 插电式混合动力汽车的“心脏”： 动力电池

2.1 从电芯到电池模组和电池包再到动力电池

在传统汽车中，内燃机被视为汽车的“心脏”。然而，在纯电动汽车 / 插电式混合动力汽车中，与电机相比，该功能更多地由动力电池来完成。虽然电池的价格多年来一直在稳步下降并且未来也可能继续下降，但是目前，动力电池仍占整车附加值的 25% 至 30%。



不同几何形状的电芯 (从左到右):
方形电芯、圆柱形电芯、软包电芯。

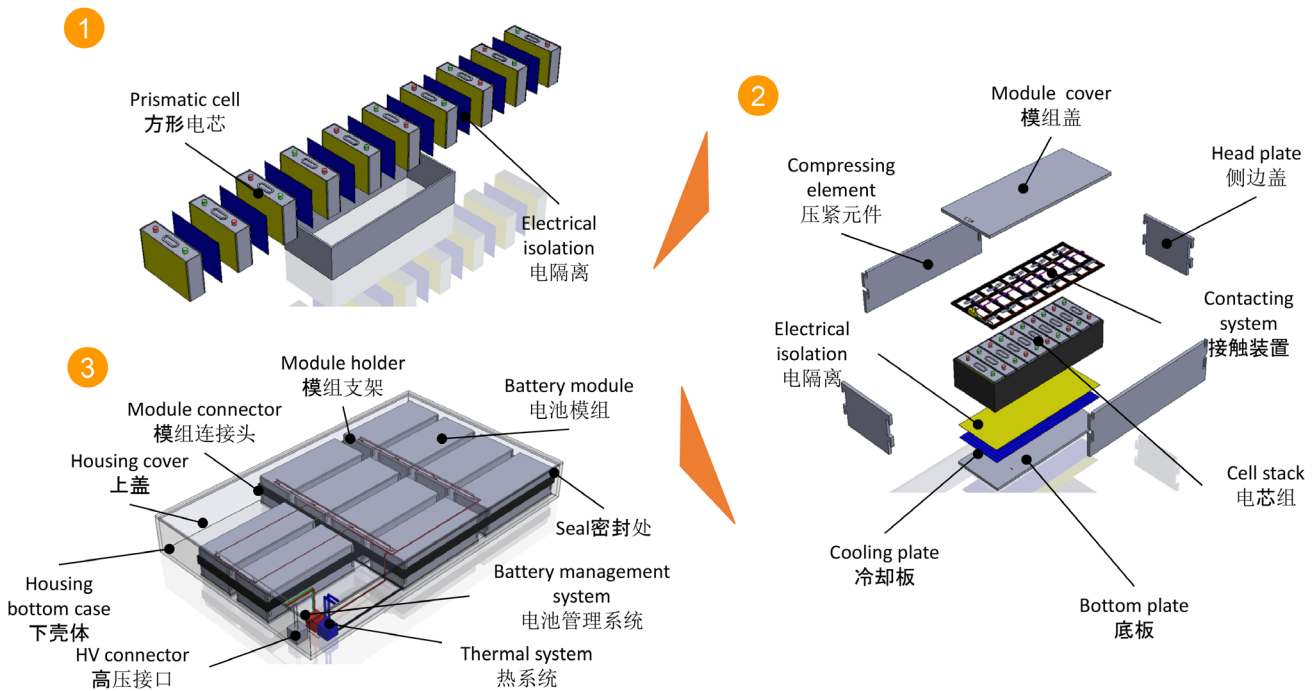
动力电池的最小制造单元是注有电解液的电芯，这是存储电能的地方。目前，电芯有 3 种不同的设计。我们在日常生活最熟悉的是圆柱形电芯（通常

为 18650 或 26650)。圆柱形电芯和方形电芯都配备稳定的壳体，软包电芯则具有袋状柔性壳体。

在制造链的下游端，单个电芯先组合成电池模组，电池模组转而连接在一起组成电池包。在制造过程结束时，这些电池包被一起放入一个壳体中。在生产每个阶段都务必确保电芯中的电解液不会漏出，也不会接触到水或湿气。只有现代化的示踪气体法才能满足这种气密性要求。

2.2 火灾风险和热失控

电芯含有易燃的电解液，因此必须对其进行可靠的泄漏检测：泄漏的电解液会带来车辆燃烧风险，甚至可能导致与火灾有关的全损。另一方面，湿气渗入则与短路风险相关，而且会缩短电池的使用寿命。电芯的海外生产现状也有问题，因为电芯在从亚洲长途运输期间损坏的情况并不罕见。这种损坏会带来严重后果——甚至是在运输期间。例如，锂离子电池和电芯存在起火危险，因此不再



电池生产中的价值链。(来源：德国亚琛工业大学、PEM)

电子书

电动交通：

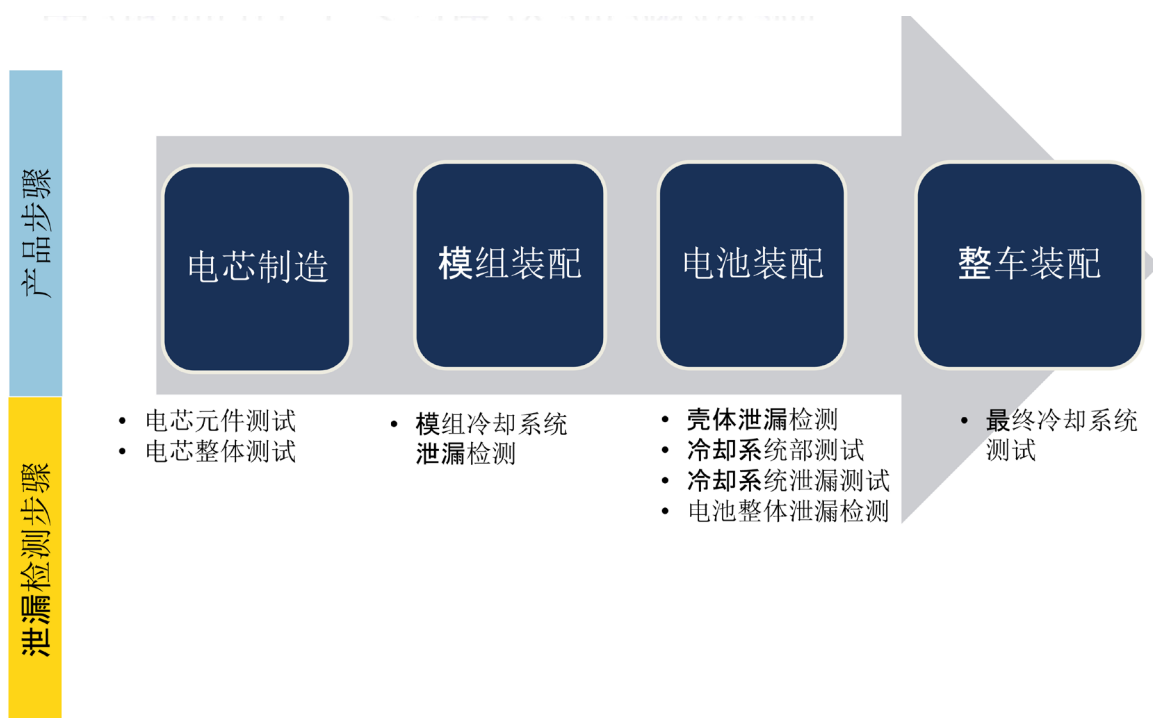
电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

允许将其作为货物通过客机运输。由货物燃烧导致的飞机失事促使各大航空监管机构禁止通过飞机运输此类电池。同时，FedEx 等运输公司也采用特殊货物泡沫系统，以对货机上装运电芯的集装箱实现针对性的灭火。更频繁出现的船舶集

装箱完全损毁事故也为人们所熟知。单个电芯“热失控”（例如由内电极局部短路引起）可能导致燃烧的电解液将整船集装箱加热至高达 1,100 摄氏度的温度，最终导致其爆炸。



与锂离子电池有关的一项最严重风险是其易燃性。



增值链不同阶段的泄漏检测。

2.3 电芯进货检测

在这样的背景下，毫不奇怪，许多专家和科学家（例如德国亚琛工业大学的电力电子及电力驱动研究所 (ISEA)）都认为设计高效的进货检测非常重要，这样，德国的制造商和供应商可以在组装前就检测出有故障的电芯。

2.4 电池模组和电池包的密封性

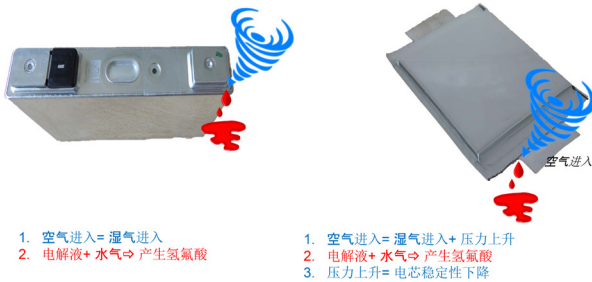
后续增值过程也要求进行各种不同的泄漏检测。电芯先被组装成电池模组，

随后再将电池模组合并成电池包。一些原始设备制造商本身已经有能力执行这些生产步骤，另一些则要从一级供应商处采购成品电池包。

电池模组以及电池包通常都包括多条冷却通道，它们既可使用水-乙二醇混合液，又可使用汽车空调系统的制冷剂工作。通常，控制汽车电池工作的电力电子装置也通过这两种方式之一进行冷却。这些系统的防漏至关重要，因为一方面，必须长期保证电池得到冷却；另一方面，冷却介质泄漏可能导致短路。

2.5 确保电池使用寿命

经证实，在纯电动汽车 / 插电式混合动力



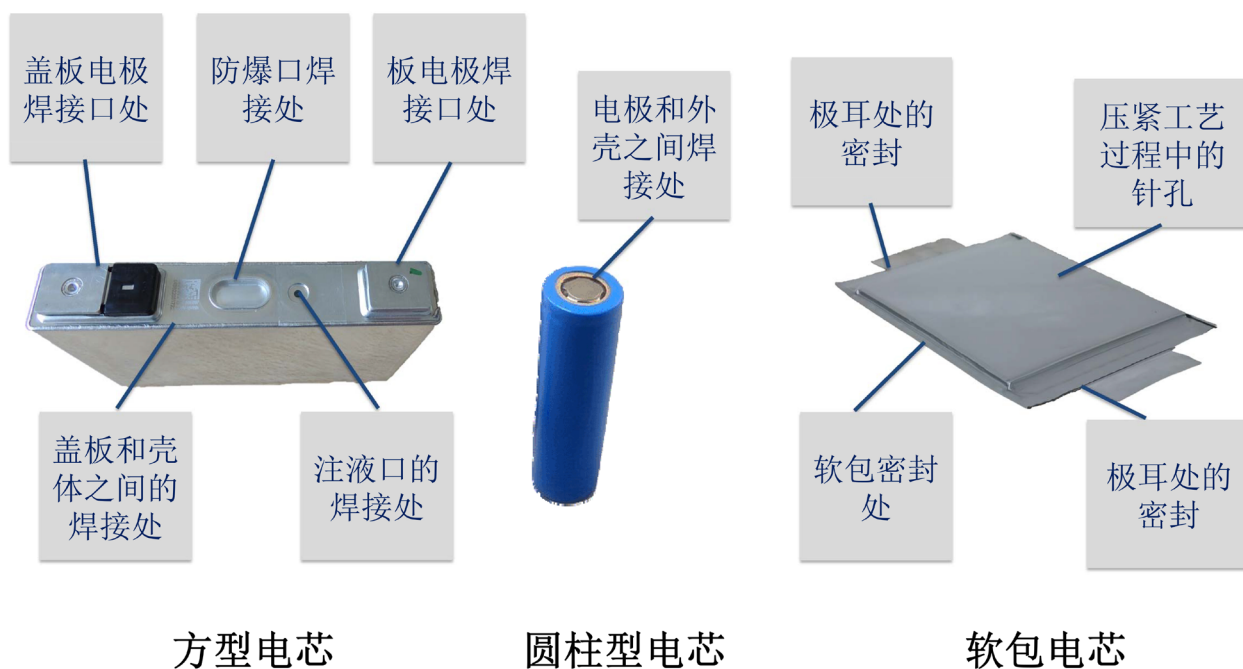
电芯必须防漏的原因：方形电芯 (左) 和软包电芯 (右)。

力汽车的日常使用中，动力电池使用寿命缩短的问题可能比潜在的短路和火灾风险问题更加重要。毕竟，当电池因工艺不良而失去大部分容量时，更换电池的费用该由谁承担？如果电池充满电都做不到续航 60 英里，通勤者又能向何处求助？电池寿命缩短的风险由谁承担？客户？经销商？汽车制造商还是其供应商？无论如何，价格高但使用寿命短的动力电池很快会导致客户不满。根据目前的估算，动力电池的可持续性目标为在 10,000 次充电循环后，剩余存储容量仍有 80% 左右。因此我们没有捷径可走，电动交通的胜利显然为质量保证带来了

新的挑战。在生产每个阶段都务必保证电芯中的电解液不会泄漏，也不会接触到水和湿气。换言之，电池必须做到气密。只有采用现代化、灵敏的示踪气体法，汽车制造商和供应商才能满足这种气密性标准。

3 电芯检测方法

电解液与水发生反应时，会生成毁坏电芯的氢氟酸。因此，在电芯的使用寿命 (许多制造商预期为 10 年) 终止时，电解液中的水浓度应尽可能低。电池整个使用寿命期间的电解液损失也必须保持在最低限度。这是有必要的，因为有害的重金属会溶解在电解液中。容许漏率的确切水平取决于几项因素，包括电芯内部的压力条件、电芯的要求使用寿命及其体积。例如，成型后的软包电芯中存在 50 至 500 毫巴的绝对负压，因此，电解液将充分润湿阳极和阴极并使电芯具有机械稳定性。具有坚固壳体的方形、纽扣和圆柱形电芯通常在常压下充注，因此没有压差。容许漏率也相应地



不同类型电芯的问题点。

更高。通常，检测所用漏率限值的数量级为 10^{-6} 毫巴·升/秒。由于容许漏率低，基于示踪气体的方法成为电芯制造中泄漏检测的首选方法。

3.1 不同类型电芯的失效模式

方形、圆柱形和软包电芯这 3 种设计都有各自的问题点。例如，方形电芯在常压下或在轻微的负压 (-20 毫巴) 下密封。成化通常会产生气态反应产物，因此在成化过程完成后，电芯内可能存在轻微的过压。任何泄漏都可能导致空气和

湿气进入电芯，最终可能导致电解液排出。方形电芯的失效模式可用于识别多个潜在的泄漏位置。其中包括盖板与两个电极接头之间的焊缝和焊接在该处的防爆片、盖板与壳体下部之间的焊缝，以及电解液加注口的密封处。在圆柱形电芯中，易漏区域位于圆柱形壳体与固定至圆柱体两端的电极之间的压接接头处。对于柔软的袋状软包电芯，袋体的密封垫、两个电极穿通密封件（在此背景下通常叫做极耳）处的裂缝以及密封后处理过程所产生的针状孔洞都会导致泄漏风险。

3.2 不同类型电芯的漏率要求

那么，不同的电芯设计对泄漏检测时应采用的漏率限值有什么要求？对于方形和圆柱形电芯，即使在常压下充注电解液后，仍有少量空气留在电芯内。因此，

如果具有一定湿度的空气进入电芯，可能会与电解液大面积接触，水可能由此进入电解液中。然而，由于几乎不存在压差，与环境空气的交换只能通过扩散实现，因此速度非常慢。

对于软包电芯，泄漏将导致空气被电芯内部的负压吸入，但是，电解液与水接触的表面积仍然很小，如果是细漏，则仅局限于泄漏通道处。

3.2.1 硬壳电芯（方形、纽扣和圆柱形电芯）的要求漏率

如要 10 年后电解液中所溶解不应该有的水的浓度尽可能地低，则容许漏率（取决于最大容许含水量和电芯的几何形状）应处于 10^{-6} 至 10^{-8} 毫巴·升/秒的范围内。在真空中检测时将人为地产生约 1 巴的压差，这样，对相同尺寸的漏孔将产生更高的漏率。因此，真空法通常用于检测 10^{-6} 毫巴·升/秒范围内的漏率。



固态电芯 (无论方形还是圆柱形) 的两种失效模式。

3.2.2 软包电芯的要求漏率

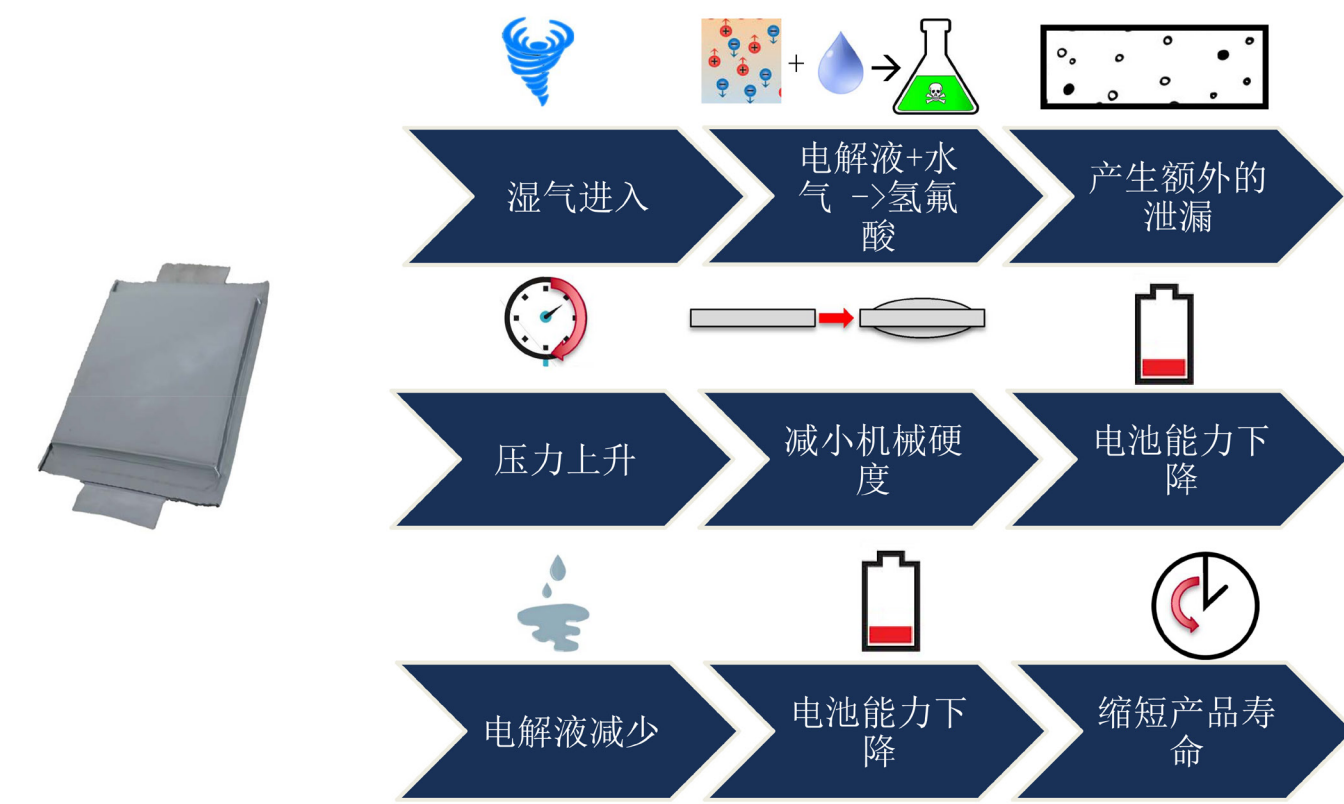
对于软包电芯，区分两种失效模型非常有用。如果出现大泄漏，即所谓的粗漏，则渗入的空气将影响电芯内要求的负压。软包电芯的防漏要求之一是使用 10 年后仍然存在负压，即内部压力小于 1,000 毫巴。这对漏率限值提出异常严格的要求：只能是 10^9 毫巴·升/秒。软包电芯第二种失效模式对漏率限值的要求则没有这么严格。如果出现针状泄漏，则空

气与电解液的接触面相对较小，电解液中不必要的水气浓度因而缓慢升高。如要使用 10 年后的水浓度低于百万分之 80，则针状毛细管漏孔的直径必须小于 1 微米。这对应 10^{-8} 毫巴·升/秒范围内的漏率限值。

然而，软包电芯的这两个理论漏率限值在实践中并不能发挥作用，因为毛细管会因电解液超过极限直径几微米（取决

深入研究的 SAE 论文

“Methods for Leak Testing Lithium-Ion Batteries to Assure Quality with Proposed Rejection Limit Standards” (通过建议的不合格判定数标准保证质量的锂离子电池泄漏检测方法) 是 INFICON 研究经理 Daniel Wetzig 博士撰写的 SAE 论文。该论文研究了各种类型锂离子电池的泄漏情况，并在 INFICON 经验的基础上讨论了相关检验的可用漏率限值，如需阅读该论文，请访问：www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-01-0448/



软包电芯的3种失效模式。

于内部压力和材料组合)而“阻塞”。也就是说，毛细管中将充满电解液，由于表面张力和润湿特性，电解液不会从毛细管末端泄漏。在实践中，这意味着，不仅电解液不能从比该极限直径更小的漏孔中溢出，空气和湿气也不能进入电解液中。在湿空气与泄漏通道末端电解液之间的非常小的接触区域(直径为几

微米的圆形区域)，极少量的水可以通过扩散进入，但水量少到可以忽略不计。

3.3 电芯壳体初步检测

许多电芯制造商已经在对电芯壳体执行泄漏检测。为此，先将方形和圆柱形电芯的坚固壳体抽空，随后重新充注 100%

电子书

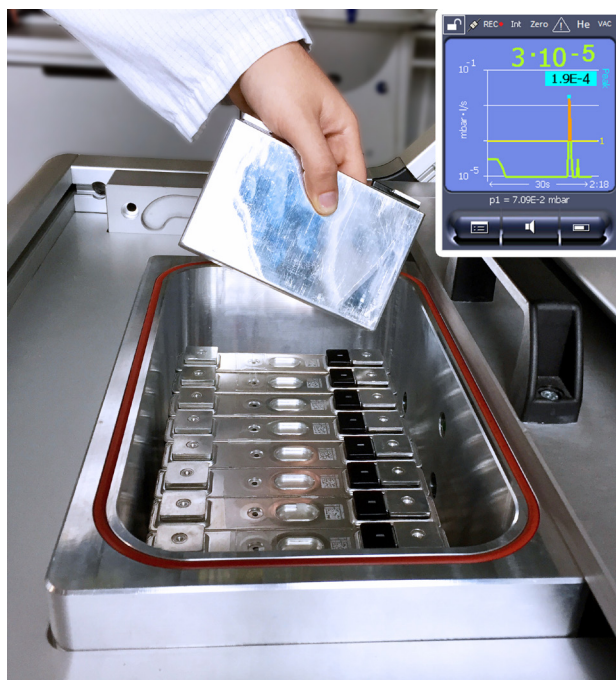
电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

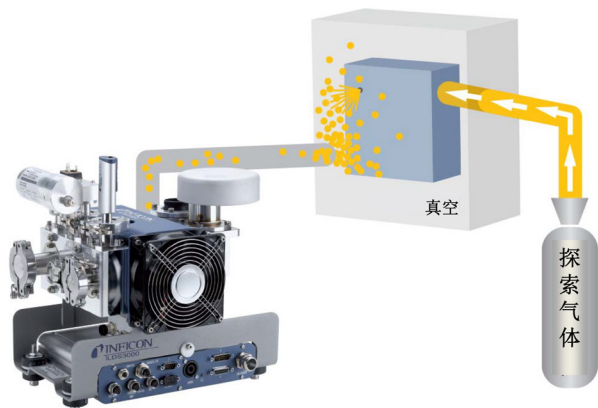
失效案例	最大容许漏孔尺寸	相应的氦气漏率
吸湿 < 百万分之80	(1微米)	约 10^{-8} 毫巴·升/秒
10年间压力没有显著增加	(<< 1微米)	< 10^{-9} 毫巴·升/秒
泄漏通道阻塞 → 无大气湿气渗入，无电解液泄漏	(2至5微米)	约 10^{-6} 毫巴·升/秒

检测所用漏率限值的推导。

的氦气并密封。然后将电芯放入真空检测室中，将检测室抽空，再测量在一段给定时间内从电芯泄漏的氦气量。确定泄漏率后，可从电芯回收氦气。对于该壳体测试，通常使用 10^{-6} 毫巴·升/秒的漏率限值。为了减少氦气需求量，也可降低氦气浓度，条件是示踪气体与干空气或氮气相混合。



未充注电解液的方形电芯的初步检测。



真空室中的氦气检测示意图。

泄漏通道直径 (漏孔尺寸)	真空检测中的氦气漏率
10微米	$3 \cdot 10^{-4}$ 毫巴·升/秒
5微米	$2 \cdot 10^{-5}$ 毫巴·升/秒
2微米	$5 \cdot 10^{-7}$ 毫巴·升/秒

真空检测时方形和圆柱形电芯泄漏通道直径与氦气漏率之间的关系，假设电芯壁厚为2毫米。

3.4 预充注电芯的泄漏检测

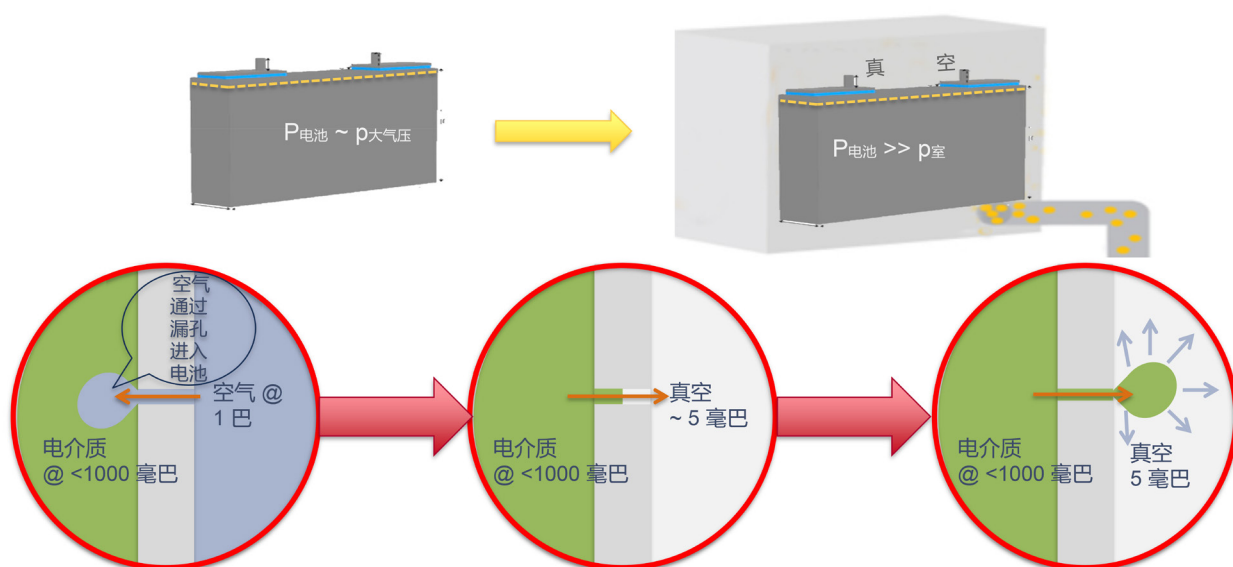
即使具有刚性壳体的电芯已接受过初步检测，加注嘴等位置仍有可能泄漏。对于软包电芯，无论如何都几乎不可能进行初步检测。因此，必须检测预充注电芯的密封性。然而，这种检测却不是一项轻松的任务。到目前为止，可用于该目的的仅有的几种方法要么不够灵敏，要么太不可靠，要么两者兼有。例如，最好情况下的最小可检漏率为 10^{-4} 毫巴·升/秒的加压法灵敏度过低，远不能完成要求漏率为 10^{-6} 毫巴·升/秒（比前者低 100 倍）的检测。此外，加压法总是会带来风险：即使最小的温度波动也会歪曲结果，尤其是试件体积较大时。而且，尽管所

谓氦轰击法的灵敏度足够高，但轰击检测是否成功在很大程度上取决于电芯的位置和漏点的确切位置。

现在，INFICON 通过一种专门开发的检测方法首次找到了补救措施。这种全新的方法使用预充注电芯中的电解液溶剂作为示踪气体。

3.4.1 直接使用电解液溶剂进行泄漏检测

为了即使在最终充注后也能可靠地对全部 3 种类型的电芯进行密封性检测，INFICON 开发出一种能够直接检测锂离子电池的任何泄漏的方法。这种新方法使用泄漏的电解液溶剂作为示踪气体。



在真空中直接检测气态电解液泄漏。

电子书

电动交通：

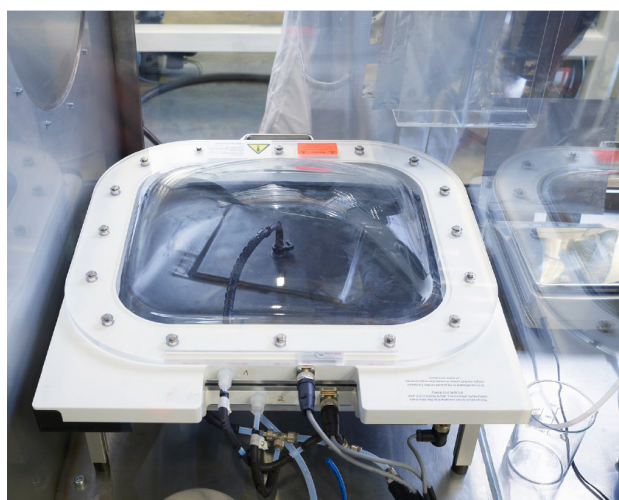
电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

通过这种方法，INFICON ELT3000 检漏仪能够识别锂离子电芯中氦等效漏率低至 $1 \cdot 10^{-6}$ 毫巴·升 / 秒的泄漏，对应漏孔直径只有几微米。刚性真空室适用于具有坚固壳体的电芯。

对于柔软的软包电芯，INFICON 开发出了一种柔性膜真空室并已获得专利，这种真空室在检测期间可以紧贴软包电芯。作为载体层，柔性膜可以保护电芯在真空中免受任何损坏。

产生真空后，电解液溶剂从潜在漏点溢出至真空室中。由于真空室中的绝对空

气压力只有几毫巴，因此，溶剂将立即蒸发，从而使其作为气体被 ELT3000 的质谱仪检测到。ELT3000 能够直接检测所有常见的电解液溶剂，例如碳酸二甲酯 (DMC)、碳酸二乙酯 (DEC)、碳酸甲乙酯 (EMC) 和丙酸丙酯 (PP)。这款检漏仪的设计使其既适合在开发部门的手工作场所使用，又适合在自动化生产线中同时检测多个电芯。纯测量时间约为 10 秒；抽空时间取决于所用真空室和泵的规格。



柔性膜真空室可防止易碎的软包电芯损坏。



在真空检测前由检测人员用手放入。

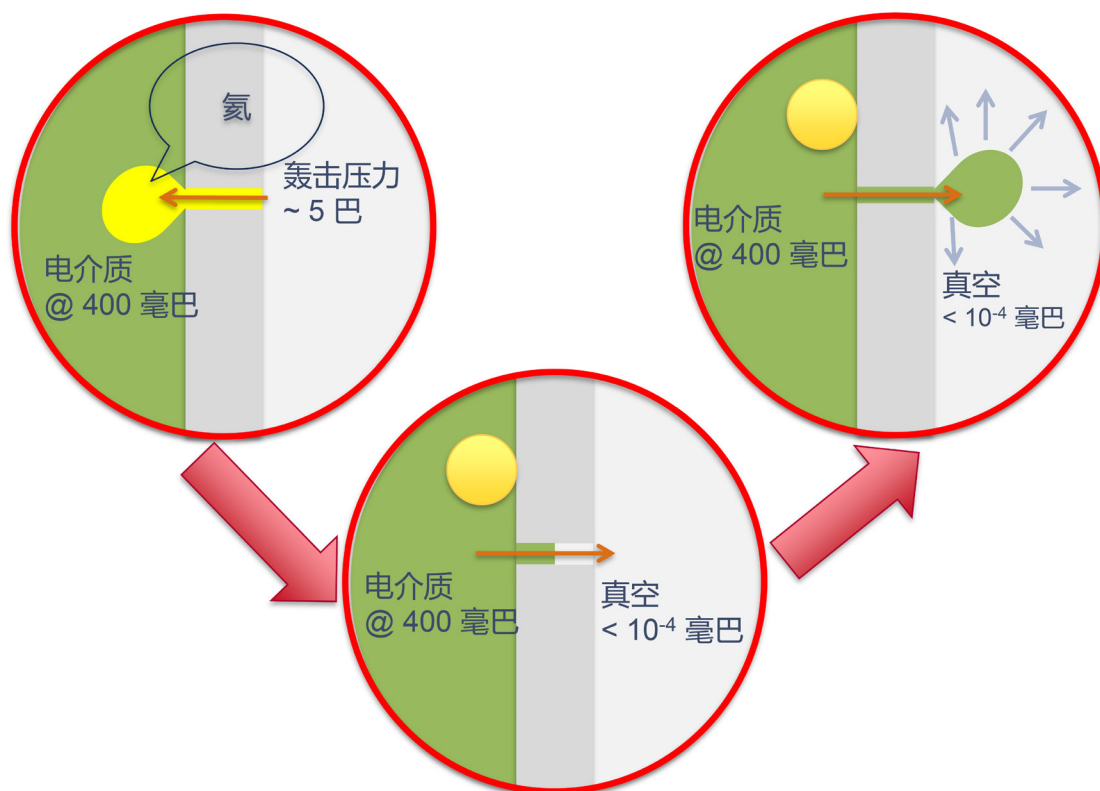
3.4.2 直接检测法优于加压法和氦轰击法

INFICON 推出的新型电池检漏仪采用质谱技术，可检漏率比传统压力测量法小 1,000 倍 —— 这是电芯达到 10 年目标使用寿命的必要条件。

在这种特别的电芯检测应用场景中，ELT3000 的可靠性也要远远高于氦轰击等方法。在氦轰击法中，电芯先被放

入真空室，然后在正压下暴露于氦气环境中。这是为了使示踪气体氦气通过任何漏点进入电芯。然后在最后一步中在氦气再次通过漏点逸出时对氦气进行检测。

无论如何，确切的泄漏位置和电芯位置对于氦轰击法成功而言都至关重要：例如，如果漏点位于电芯底部，则最终真空检测无法可靠地检测示踪气体，因



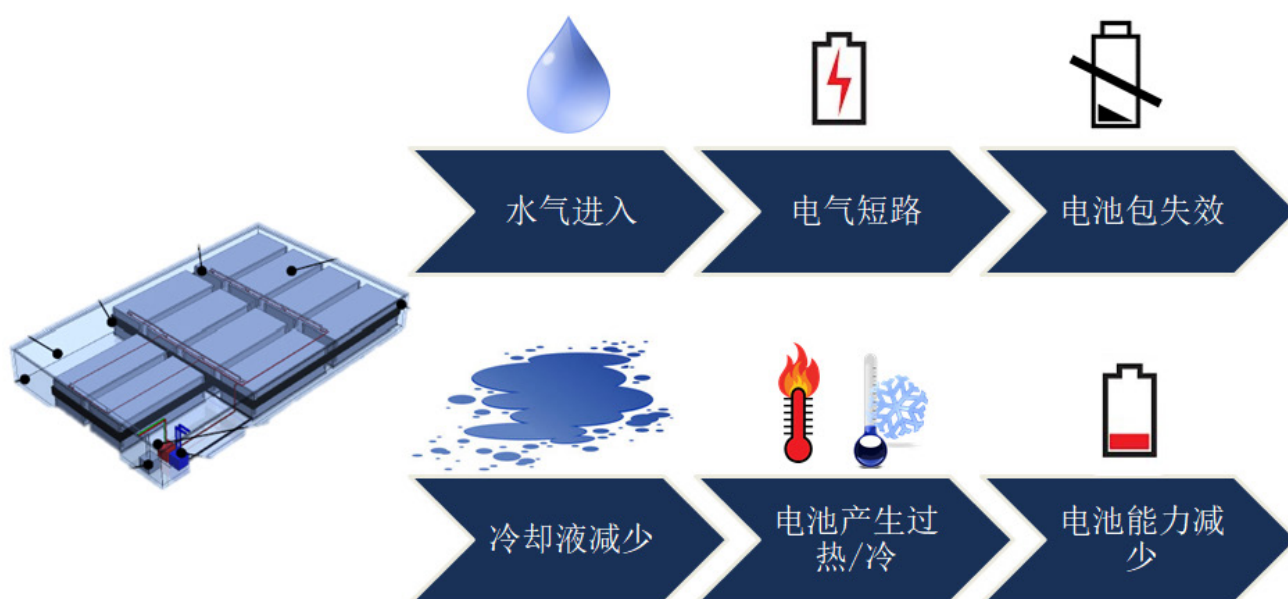
氦轰击法不适合对电芯进行泄漏检测的原因。

为电芯内很轻的氦气会升高至顶部，有时甚至不会从底部漏点逸出。全新的直接检测法则没有这些问题：对预充注锂离子电池进行检测时，无论使用方形、圆柱形还是软包电芯，都能兼顾准确性和可靠性。

4 对电池包壳体的要求

电池包壳体具有特定的防漏要求，因为它们必须为其内部的电池模组和电芯提

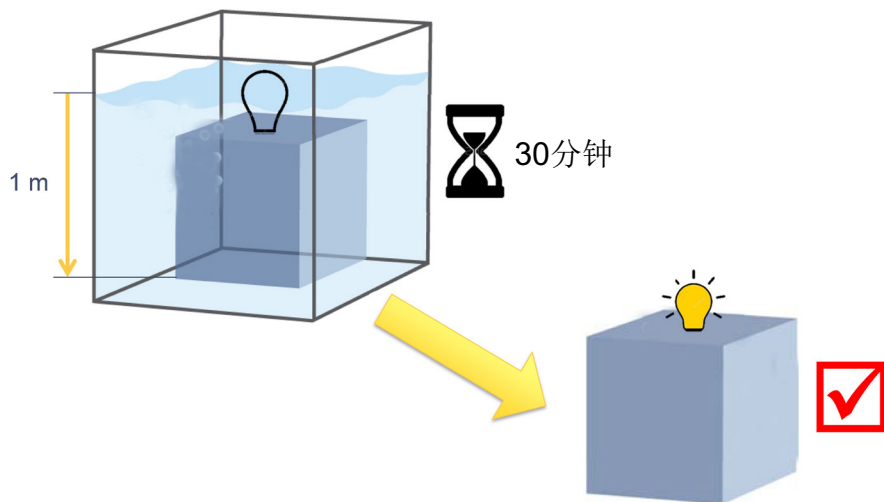
供防水保护。根据在汽车中的安装位置，电池包壳体必须满足 IP67 或 IP69K 等防护等级的要求。如果壳体可能暴露于高压清洗机的射流中，则防护等级必须达到 IP69K。但是，如果汽车动力电池下方安装有另一块底板，则电池包壳体只需满足防护等级 IP67 的要求。应按照哪种特定漏率限值再次执行检测取决于壳体的制造材料。钢和塑料的要求相对不严格，铝的要求则特别高。



电池包的两种故障机理。

技术点 1：IP67 —— 壳体材料决定漏率限值

无论是锂离子电池壳体、电源控制单元壳体、电机壳体还是电子模块壳体，载流部件的壳体通常按照防护等级 IP67 的要求进行设计。IP67 的检测要求是，在 1 米深处浸浴 30 分钟后，部件必须保留其全部功能。在某些情况下，这意味着不得有任何类型的水渗入部件中。更详细地了解 IP67 的要求可以理清两点。第一点，只有使用现代化的示踪气体法才能检测要求的漏率限值。第二点，壳体材料本身对防漏要求有重大影响，因为与一些材料相比，水滴更易从另一些材料上分离，从而通过泄漏通道进入壳体。



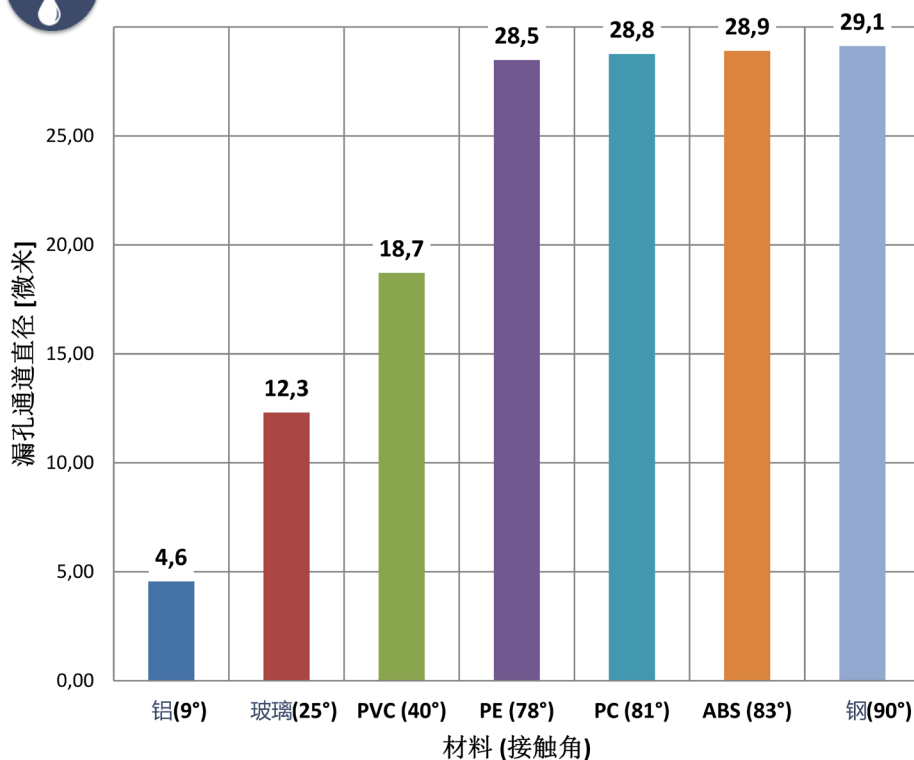
IP67的定义。

壳体材料决定漏率限值

使用规定长度和直径的玻璃毛细管进行检测可以说明在 IP67 要求的 0.1 巴的压差下水滴何时渗入泄漏通道。如果玻璃泄漏通道长度为 10 毫米，直径为 20 微米，则该泄漏尺寸对应的氦气漏率限值为 $2 \cdot 10^{-4}$ 毫巴·升/秒 (0.01 标准立方厘米/分钟)。如果在上述压力条件下的实验中使用这种玻璃毛细管，则第一个水滴很快就会出现，但要经过 30 多分钟后才会从玻璃上分离。理论上，当玻璃毛细管直径为 12 微米时，0.1 巴的水压随后与使水附着在 10 毫米长的泄漏通道表面上的力相平衡。实验表明，在 30 分钟内，即使玻璃毛细管直径为 15 微米，也不会再形成水滴。



不同材料对水的漏孔通道限制直径 @1.1 --> 1 巴



按照IP67 (100毫巴过压) 的要求检测各种材料时的渗水极限直径。

通常，水滴与玻璃的分离效果相对较差，因为水能够很好地附着在玻璃表面上。水滴在钢或 ABS 等其他材料上的附着性比玻璃略好。此处所述的泄漏导致水在 0.1 巴的压差下渗入壳体之前，泄漏通道的直径必须稍大一些。如要确保钢或 ABS 制成的壳体具有 IP67 要求的水密性，建议按照约 $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (0.06 标准立方厘米 / 分钟) 的漏率限值进行检测。另一方面，铝制壳体具有更高的防漏要求。在这种情况下，只有泄漏直径非常小时，水滴才会附着在材料上。因此，要在半小时 IP67 场景下检测铝制壳体是否完全防水，必须按照 100 倍漏率下限，即在 10^{-5} 毫巴·升 / 秒 (0.01 至 0.05 标准立方厘米 / 分钟) 的范围内进行检测。

几个水滴或完全没有水滴？

防护等级 IP67 要求，在规定的浸浴过程结束后，部件的全部功能保持不变。IP67 未明确要求的是，在压差为 0.1 巴的 30 分钟浸浴过程中根本不能有水渗入部件中。如果制造商决定可以容许几滴水渗入，因为这不会影响部件的功能，则制造商可以相应地选择其他漏率而不是漏率下限进行检测。例如，如果部件具有带聚合物密封垫的 ABS 或钢制壳体，则按照 $5 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (约 0.3 标准立方厘米 / 分钟) 的漏率限值进行检测将确保只有个别的水滴会渗入。但是，为了检测是否完全防水，需要采用 $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (约 0.06 标准立方厘米 / 分钟) 的漏率限值。



玻璃毛细管	220 x 33	150 x 43	75 x 27	40 x 22	15 x 30	[微米 x 毫米]
空气漏率	56	9	1	0.1	0.001	[标准大气压*毫升/分]
空气漏率	1.01×10^0	1.69×10^{-1}	1.69×10^{-2}	1.69×10^{-3}	6.91×10^{-5}	[毫巴*升/秒]
氮漏率	9.51×10^{-1}	1.58×10^{-1}	1.58×10^{-2}	1.58×10^{-3}	6.42×10^{-5}	[毫巴*升/秒]
液滴间隔	~ 1	~ 1.5 - 2	~ 60	~ 120 - 180	---	[秒]
30 分钟后液滴数	~ 1800	~ 1200 - 900	~ 30	~ 15 - 10	---	

气体漏率与水漏率之间的关系。

示踪气体法优于压力衰减法

在实践中， 10^{-3} 毫巴·升/秒 (0.06 标准立方厘米/分钟) 数量级的漏率代表使用传统压力衰减检测法在理想条件下能够检测的漏率限值。因此，在生产中进行泄漏检测时，许多制造商仅依靠可达 10^{-2} 毫巴·升/秒 (或可达 1 标准立方厘米/分钟) 的漏率限值，在检测粗漏时则依靠通常没有那么可靠的压力衰减检测法。这是因为，在检测过程中，即使最小的温度波动也会对压力变化的测量产生严重影响，尤其是在部件体积较大时。这在压力衰减检测中无法完全得到补偿，并且很容易导致误检或漏检结果。因此，对于 10^{-3} 毫巴·升/秒或更小 (< 0.06 标准立方厘米/分钟) 范围内的所有漏率限值，更适合采用可靠性更高的基于示踪气体的方法，因为它们不受温度的影响。具体检测方法的选择还取决于部件能够承受的压差。许多设计满足防护等级 IP67 的部件只能承受相对较小的 0.1 或 0.2 巴的压差。否则，部件或其密封垫会被损坏。

4.1 在真空室或累积室中对壳体进行初步检测

相比之下，尚未组装的铸铝壳体能够承受较高的压差。因此，在真空室中进行氦气泄漏检测是初步检测这种铸铝壳体密封性的一种合适的方法。除了灵敏度高之外，真空法的巨大优势还有速度快：模块化检漏仪（例如 LDS3000）能够在生产线上实现特别短的生产周期。在真空法中，试件先被抽空，再被充注压力大于等于 1 巴的示踪气体氦气，然后在真空室内围绕试件产生真空。通过这种方式，可以立即检测到逸出的氦气。或者，也可使用小于等于 6 巴的压力，但这样，氦气浓度会降至 15%。无论如何，使用真空法时，压差都很大，因此，执行检测时必须参照的漏率限值增加了约 10 倍。这样，为了检测铝制壳体是否完全防水，不会按照 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.01 至 0.05 标准立方厘米/分钟) 而是按照 10^{-4} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方

厘米/分钟) 范围内的漏率限值在真空室内执行检测。但是，在真空检测中，材料特性（有关水在其上的附着性）与检测所用相应漏率限值之间的基本关系实际上保持不变。钢和塑料的要求最低，铝的要求则特别高。

测试程序也因材料而异。对于由相对容易变形的塑料制成的壳体，无法在检测开始时将其完全抽空。如要将壳体完全抽空，则只能抽空至最大容许负压。随后用示踪气体将适度抽空的壳体充注至最大容许正压。测量逸出的示踪气体时，应注意，示踪气体浓度低于壳体完全抽空时的浓度，因为氦气仍然留在部件内的残余空气相混合。因此，测得的实际漏率较低，始终必须使用必要的系数进行校正。

在生产线上检测部件密封性的最快、最准确的方法是在真空室中进行氦气检测。对已组装和未组装壳体进行整体泄漏检测的另一种选择是累积检测，尽管这种方法所需的生产周期有点长。可利用简

单的累积室确定示踪气体是否从试件内部逸出。风扇确保逸出的示踪气体在累积室内分布并累积于此，以由固定式传感器检测。INFICON 的 LDS3000 AQ 检漏仪可在这种检测系统中使用。它使用氦气或经济的合成气体（由 5% 的氢气和 95% 的氮气组成的不可燃混合气）作为示踪气体。尽管可检漏率低至 10^{-5} 毫巴·升/秒（约 0.03 标准立方厘米/分钟），累积室的死区容积也相应较低，但是，使用 LDS3000 AQ 进行累积检测的成本却与简单的空气检测同样低。因此，累积检测适合由塑料或钢制成的壳体。对于检测漏率限值为 10^{-5} 毫巴·升/秒（0.03 标准立方厘米/分钟）的要求更高的铝制壳体，仍需进行真空检测。

4.2 自动化机器人吸枪检漏

例如，如果制造商想要对已组装电池包的密封垫进行完整性检测，真空检测并不可取，因为过高的压差会损坏密封垫，而负压会毁坏已安装的电容器。对成品电池包和已组装壳体进行检测时，建议使用基于示踪气体的吸枪检漏法。既可将吸枪检漏仪的测量探尖连接至机械臂，使其随机械臂沿着壳体底部与盖板之间的所有连接点移动；又可由一名检测人员手动引导测量探尖越过壳体上的问题点。原则上分为静态检漏（即吸枪探尖在定义点上方停留几秒，然后继续移动至下一个点）与动态检漏。在后一种情况下，机械臂或检测人员在表面上（例如沿着焊缝或已安装的密封垫）连续移动吸枪探尖。



使用LDS3000 AQ检漏仪进行累积检漏

电子书

电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

在静态和动态吸枪检漏中，吸枪探尖与试件表面之间都应保持最小可能安全距离，尤其是在使用机械臂进行自动化检测时。这是因为，虽然吸枪探尖不得接触部件，但必须仍能可靠地检测到逸出的示踪气体云。在这种情况下，部件公差和潜在漏点的可达性是限制因素。此外，无论如何，机器人检测系统都应位于屏蔽区域内，以免逸出的示踪气体云被吹散——理想情况下，机器人站的有机玻璃安全罩也将保护检测免受生产区域内空气流动的影响。

在动态机器人吸枪检漏中，除了吸枪探尖的最小可能安全距离之外，吸枪流量大小也发挥着决定性的作用。因此，为

了能够高度可靠地执行机器人检漏，吸枪检漏仪必须以高气体流量吸入待检测空气。传统吸枪检漏仪工作时的气体流量通常只有 60 标准立方厘米 / 分钟，因此完全无法实现动态机器人吸枪检漏。

INFICON 推出了 **Protec® P3000XL** 和 **XL3000flex**，这两款检漏仪的气体流量高达 3000 标准立方厘米 / 分钟。它们专门开发用于执行快速机器人检漏。**Protec P3000XL** 使用氦气工作，适合达到 10^{-4} 毫巴·升 / 秒 (低至 0.01 标准立方厘米 / 分钟) 数量级的中等漏率限值的动态机器人检漏。凭借静态机器人吸枪检漏以及与试件保持最小可能距离，这款检漏仪的可检漏率实际上可达 10^{-5} 毫巴·升 / 秒。然而，**XL3000flex** 的灵敏度更高。因此，建议使用这款检漏仪进行漏率限值低于 $1 \cdot 10^{-4}$ 毫巴·升 / 秒 (0.06 标准立方厘米 / 分钟) 的动态机器人吸枪检漏。**XL3000flex** 既可使用氦气作为示踪气体，又可使用经济的合成气体工作。总线接口使 **XL3000flex** 能够轻松集成到各种不同的生产环境中。



使用LDS3000模块化检漏仪以及XL吸枪适配器进行机器人吸枪检漏的示意图。

电子书

电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

动态机器人吸枪检漏用于对完全组装的电池包进行泄漏检测。首先，部件被抽空至某种程度，然后，部件内产生仅 0.1 巴的示踪气体过压。机械臂随后自动引导示踪气体传感器沿着电池包的密封垫移动，以检测任何泄漏的示踪气体。在这种情况下，任何泄漏通道都由一侧的壳体材料（通常是铝）与另一侧的密封垫聚合物组成。相应地，检测密封垫所用的漏率限值也应在材料的典型漏率之间取平均值。因此，对于这种检测场景， 10^{-4} 毫巴·升/秒 (0.01 至 0.05 标准立方厘米/分钟) 范围内的漏率限值已经足够，

尽管纯铝材料要求在 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘米/分钟) 的范围内进行检漏。



机器人吸枪检漏的两项限制因素。

	抽空压力	充注后的示踪气体浓度	泄漏率校正系数 ²
1.1巴 (100毫巴)	不抽空	9%	0.09
	0.9巴	18%	0.18
1.2巴 (200毫巴)	不抽空	17%	0.17
	0.8巴	33%	0.33
1.3巴 (300毫巴)	不抽空	23%	0.23
	0.7巴	46%	0.46
1.4巴 (400毫巴)	不抽空	29%	0.29
	0.6巴	57%	0.57
1.5巴 (500毫巴)	不抽空	33%	0.33
	0.5巴	67%	0.67

1) 最大压差

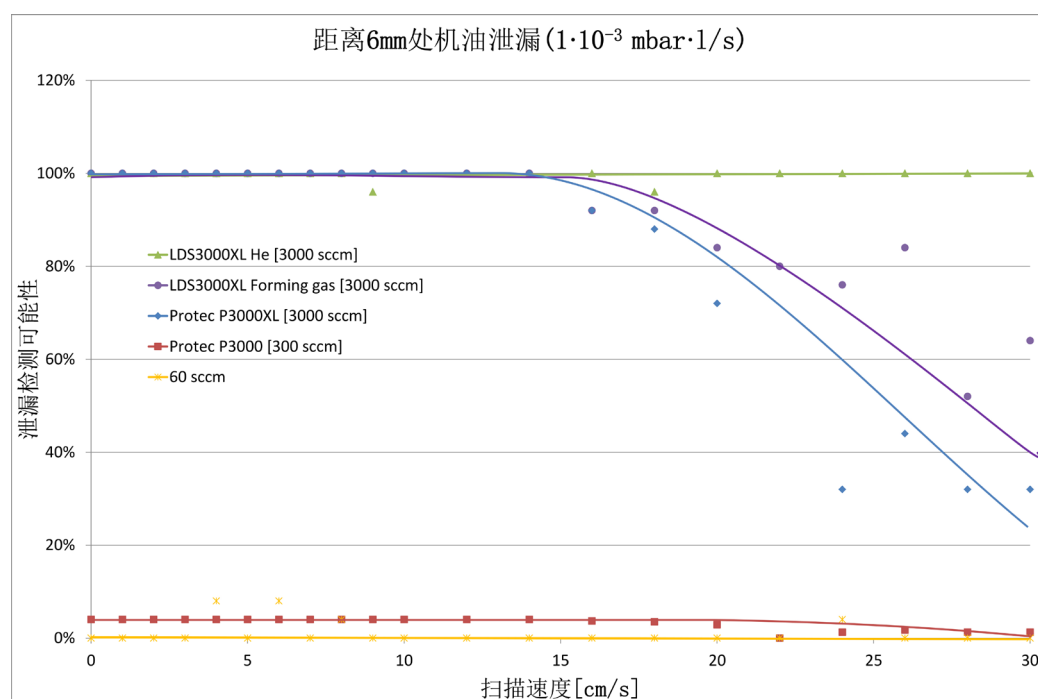
2) 真实漏率与显示漏率之比。

示踪气体浓度对漏率测量的影响

技术点 2：为什么高气体流量在机器人吸枪检漏中至关重要

动态吸枪检漏应同时完成两个目标：首先，应检测试件在更大面积上是否有任何泄漏；其次，应以尽可能快的速度完成该操作。遗憾的是，这两个目标很难相互调和。这是因为，漏率越低，逸出的示踪气体云在泄漏位置分布得就越慢。

许多传统吸枪检漏仪通过吸枪探尖以只有 60 至 300 标准立方厘米 / 分钟的颗粒流量范围吸入气体。有些时候，如果用手小心地操作吸枪探尖，例如如果只有几个检测点并且只是靠近表面缓慢地移动吸枪探尖，这是足够的。但是，动态机器人吸枪检漏的要求却高得多。



漏油的动态机器人吸枪检漏，漏率为 10^{-3} 毫巴·升/秒。

一系列测试说明了探尖的扫描速度或前进速度有什么影响，例如在按照 $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (0.06 标准立方厘米 / 分钟) 的漏率检测时 (以与试件保持 6 毫米的安全距离，漏率为 $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒的检测为例 —— 参见第 31 页的图)。令人清醒的结果是：以只有 60 标准立方厘米 / 分钟的流量吸入气体的传统市售吸枪检漏仪在这种情况下完全失效。使用这种检漏仪时， $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (0.06 标准立方厘米 / 分钟) 泄漏的检出率为零。即使以 300 标准立方厘米 / 分钟的颗粒流量运行的检漏仪也不适合这种应用。

只有专为 3000 标准立方厘米 / 分钟的流量设计的检漏仪 (例如 **Protec P3000XL** 和 **XL3000flex**) 才能满足动态机器人吸枪检漏的要求。如果机械臂引导这些检漏仪的测量探针以低于约 14 厘米 / 秒 (5.5 英寸 / 秒) 的速度在试件表面上方移动，则 100% 能够检测出并精确定位低至漏率限值 $1 \cdot 10^{-3}$ 毫巴·升 / 秒 (0.06 标准立方厘米 / 分钟) 的泄漏。检测速度高于 14 厘米 / 秒 (5.5 英寸 / 秒) 时，**Protec P3000XL** 的检出率缓慢降低；即使在检测速度高达 30 厘米 / 秒 (12 英寸 / 秒) 时，**XL3000flex** 仍能完全可靠地检测出泄漏 —— 条件是使用氦气作为示踪气体。

如果以更低的漏率限值 $1 \cdot 10^{-4}$ 毫巴·升 / 秒 (0.006 标准立方厘米 / 分钟) 执行该检测，则可证实高气体流量的必要性。同样，只有气体流量为 3000 标准立方厘米 / 分钟的检漏仪才能达到 100% 的泄漏检出率。但是，这需要将测量探针的前进速度降至最高 8 厘米 / 秒 (**Protec P3000XL**) 和 10 厘米 / 秒 (4 英寸 / 秒) (**XL3000flex**)。

4.3 使用合成气体进行手动吸枪检漏

如果要手动而不是自动执行吸枪检漏，例如在壳体试生产期间，那么，像 INFICON Sensistor Sentrac 这样的检漏仪也适用于该目的。Sensistor Sentrac® 使用成本较低的合成气体作为示踪气体，并且仍然满足带聚合物密封垫的铝制壳体有些高的防漏要求，即漏率限值在 10^{-4} 毫巴·升/秒 (0.01 至 0.05 标准立方厘米/分钟) 的范围内。即使在试生产中仍然由检测人员手动执行吸枪检漏，在流水生产中通常建议使用检漏仪 (例如 Protec P3000XL 或 XL3000flex) 进行自动化检测。如果壳体随后需要返工，可再次使用 Sensistor Sentrac 执行手动检测以检验结果。



Sensistor Sentrac —— 合成气体手动吸枪泄漏检测仪。

5 冷却部件的密封性

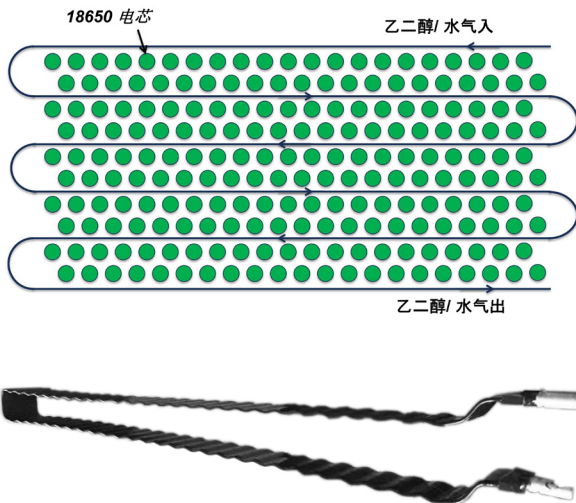
动力电池是否得到可靠冷却会影响其运行安全和使用寿命。电池在驾驶模式下和充电过程中会变热。因此，务必确保电芯以及动力电池的电子控制单元 (ECU) 得到可靠冷却。通常使用两种不同的冷却系统：被动风冷系统和主动液冷系统。在后一种情况下，必须再次根据液体介质进行区分。液体介质包括水 - 乙二醇混合液或制冷剂，例如 R1234yf。冷却液在主动冷却中穿过的冷却通道通常由铝或铜制成。冷却部件泄漏检测的目的不只是确保电池得到有效冷却。如果水或制冷剂漏出，则电芯和电池模组可能出现短路。

5.1 乙二醇 - 水冷却液或制冷剂

在特斯拉 Model S 等纯电动汽车中，18650 型圆柱形电芯组合成电池模组。16 个这样的模组则构成一个电池包。引导水 - 乙二醇混合液通过电池模组的冷

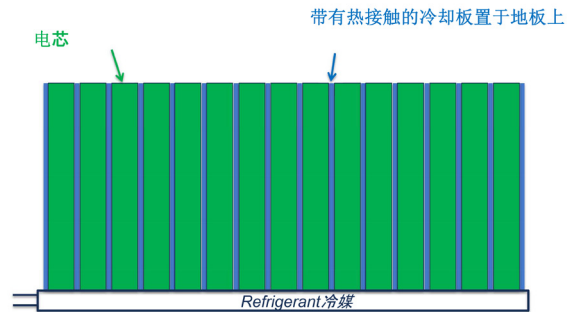
却盘管沿着 S 形路径穿过各层圆柱形电芯。在 Model S 的电池中，16 个这样的模组组合成一个电池包。这种电池结构目前在中国也非常普及。

由方形电芯组成电池模组结构的一个示例是 BMW i3。在这种情况下，电芯在数量更多的冷却板之间分层排列，冷却板



圆柱形电芯冷却示意图和冷却旋管图示。

则连接至布满制冷剂管的底板。电池模组通过来自汽车空调系统的旁路并因此最终通过制冷剂得到冷却。



方形电芯冷却示意图。

5.2 冷却回路部件的防漏要求

具体的防漏要求取决于冷却介质。对于水-乙二醇混合液(更常见的方法)，漏率限值为 10^3 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米/分钟)。对于 R1234yf 等制冷剂，由于其易燃性，甚至应按照约 10^5 毫巴·升/秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘米/分钟) 的漏率对其进行检测。 10^{-3} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米/分钟) 的漏率限值可能误导检测人员使用简单的压力衰减法来确定部件的水密性。但遗憾的是，压力衰减检测并不适合这种应用。由于其本身的性质，冷却回路部件(例如冷却板和热交换器)极易受到温度波动的

影响 —— 随着温度的变化，测试部件中测得的空气压力也出现变化。仅 0.1 摄氏度的温度波动已经可以使压力衰减检测的结果出现高达 100 倍的误差。

在简单的累积室中测试冷却回路部件反而更有意义。在此过程中，逸出的示踪气体聚集在检测室中，数秒钟后便能被检测到。除了氦气之外，也可使用成本特别低的合成气体，即由 95% 的氮气与 5% 的氢气组成的不可燃混合气。为此，可使用 INFICON 推出的一款新型 LDS3000 AQ 检漏仪。它使用简单的累积法检测液体泄漏，可靠性堪比以往更加复杂的氦气真空检测法。这款检漏仪的可检漏率在 10^{-5} 毫巴·升/秒的范围内，检测成本则与简单的空气检测同样低。然而，氦气真空测试确实具有一项优势，因其能够实现比累积测试更短的循环时间。

5.3 在安装电池期间进行吸枪检漏

电芯制造完成、灌注电解液并组合成电池模组，进而再将电池模组合并成电池包后，这些电池包仍需安装到电动汽车中。也就是说，汽车制造商也会发现自己面临涉及到冷却回路的泄漏检测任务。安装动力电池后，原始设备制造商必须对水 - 乙二醇回路或制冷剂回路的接头执行密封性检测。

制冷剂冷却的确切漏率限值取决于其规格。相应制冷剂的容许漏率（通常以克/年或盎司/年为单位表示）的范围为 2 至 5 克/年 (0.07 至 0.18 盎司/年)，对应的氦气漏率在 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘米/分钟) 的范围内。然而，在吸枪检漏期间，有些检漏仪能够使用相应制冷剂本身作为示踪气体，并由此直接检测溢出的制冷剂。



用于检测乙二醇和制冷剂的Ecotec E3000多气体检漏仪。

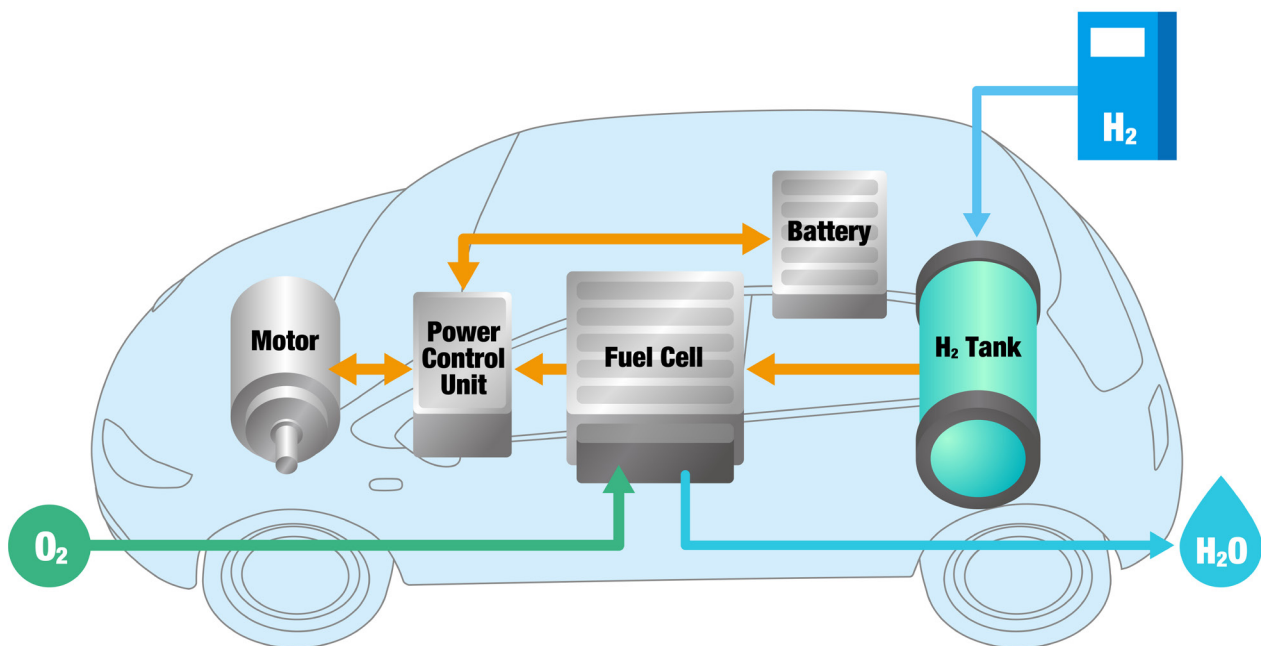
INFICON Ecotec E3000 便是具有此类特性的多气体泄漏检测仪，用户可从所有相关制冷剂库中选择具体情况下所需的制冷剂。吸枪检漏是在充注阀关闭后对其执行密封性检测的唯一选择。

必须按照 10^{-3} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米/分钟) 的漏率限值检测水-乙二醇冷却回路的密封性。为此，既可使用合成气体 (和 Sensistor Sentrac) 进行吸枪检漏，又可使用氦气 (以及 Protec P3000XL 或 INFICON XL3000flex 等检漏仪) 进行吸枪检漏，对于氦气法，5% 的示踪气体浓度已经足够。后两款检漏仪都使用高达 3000 标准立方厘米/分钟的气体流量工作。如“[技术点 2: 为什](#)

么高气体流量在机器人吸枪检漏中至关重要”所述，这是自动化吸枪检漏的前提条件。与 P3000XL 相比，XL3000flex 在生产条件下具有更高的可靠性。这款检漏仪适合恶劣的生产环境，具有较高的处理速度，即使在示踪气体本底浓度较高时也能检测泄漏。

6 燃料电池电动汽车 (FCEV) 及其部件

燃料电池电动汽车 (FCEV) 有许多部件，它们与纯电动汽车的部件有着相同的防漏要求。这是因为两类汽车最终都由相

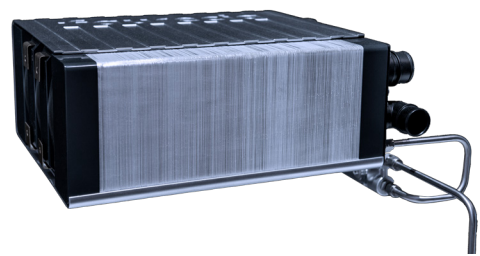


燃料电池汽车 (FCEV) 的布局。

同的电机驱动。为这些电机供电的锂离子电池也基本相同，只是燃料电池汽车中锂离子电池的体积要小得多，电池容量也更低。这是因为它们在燃料电池电动汽车中仅用作缓冲电池。其任务是暂时存储电能，从而使燃料电池始终能够在最佳运行点运行。动力电池的各种检测任务与第3章“电芯检测方法”和第4章“对电池包壳体的要求”中已描述的任务基本相同。稍后将在第8.1节“电气部件和电子部件”中讨论电机的具体防漏要求。

燃料电池电动汽车与纯电动汽车的根本区别在于前者自己产生电能。燃料电池电动汽车配备储氢罐，由氢在原电池（即燃料电池）中产生电能。氢与大气氧的这种受控反应所产生的唯一废气是对生态完全无害的水蒸气。因此，虽然其电气部件和电池的检测要求与纯电动汽车或插电式混合动力汽车相同，燃料电池

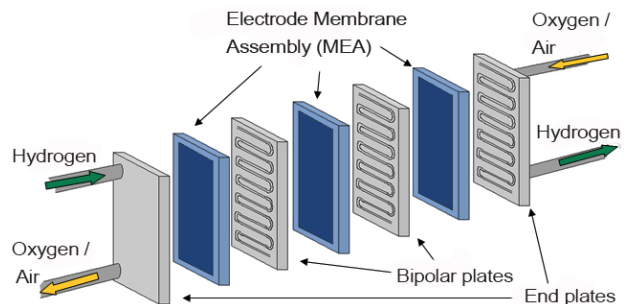
电动汽车却面临燃料电池部件必须满足许多防漏要求的额外挑战。燃料电池电动汽车的储氢罐、氢管路和氢回路也需要进行泄漏检测——这些将在第7章“储氢罐和氢管路”中讨论。



组装好的燃料电池堆。

6.1 燃料电池的双极板

燃料电池堆是燃料电池汽车的“心脏”。这些燃料电池堆由两个端板和几个夹在二者中间的双极板组成。双极板由膜电极（MEA）相互隔开。作为导电板，双极板的功能是将一个电池的阳极连接至另一个电池的阴极。每个双极板包含两个

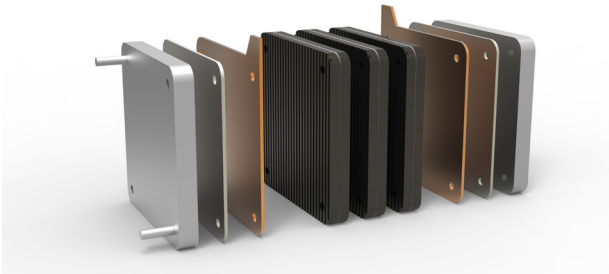


燃料电池堆的布局。

电子书

电动交通：

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测



双极板 —— 为3种不同的介质提供3种不同的通道。

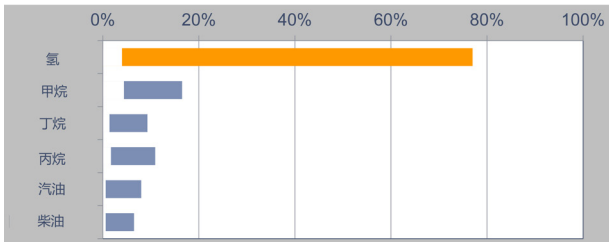
腔 (用于容纳工艺气体氢和大气氧) 以及一个内部冷却回路。从工艺气体流的腔开始, 工艺气体氢和大气氧通过所谓的流场被大面积地引导至膜电极的薄膜处。相应的高温冷却回路的任务是为整个燃料电池系统保持最佳工艺温度。

基本上, 燃料电池有4种失效模式:

- a. 可燃氢泄漏或损失。
- b. 氢泄漏, 随后通过阳极与阴极之间的所谓交叉泄漏或通过密封垫处向外泄漏与氧失控反应。
- c. 冷却液损失, 由此导致效率损失和燃料电池堆损坏。
- d. 氢泄漏到冷却回路中, 这一方面具有腐蚀作用, 另一方面会降低冷却效率甚至损坏泵, 因为冷却液中有气泡。

 氢泄漏	 空气泄漏	 冷却液泄漏
 从氢路向外 <ul style="list-style-type: none">燃料电池缺供易燃性气体浓度	 从空气路向外 <ul style="list-style-type: none">燃料电池缺供	 从冷却液通道向外 <ul style="list-style-type: none">燃料电池过热缺电
 从氢路进入空气路 <ul style="list-style-type: none">H2 与 O2 反应失控缺陷扩大	 从空气路进入氢路 <ul style="list-style-type: none">H2 与 O2 反应失控缺陷扩大	 从冷却液通道进入空气路 <ul style="list-style-type: none">阻塞气路燃料电池缺供
 从氢路进入冷却液通道 <ul style="list-style-type: none">气泡在冷却液中腐蚀泵泵损坏燃料电池过热	 从空气路进入冷却液通道 <ul style="list-style-type: none">气泡在冷却液中泵损坏燃料电池过热	 从冷却液通道进入氢路 <ul style="list-style-type: none">阻塞气路燃料电池缺供

燃料电池的失效机理。



不同燃料的可燃性极限。

不同的漏率要求源于不同的失效场景。氢泄漏 (泄漏到外面以及泄漏到冷却通道中) 通常应按照 10^{-4} 至 10^{-6} 毫巴·升高 / 秒的漏率进行检测。然而, 通常情况下, 氢漏率应尽可能地低, 这只是因为氢在空气中的氢浓度为 4% 至 73% 的整个范围内均可燃。因此, 选择漏率限值时降低一个数量级并按照 10^{-7} 毫巴·升 / 秒进行检测可能很有意义。

6.2 双极板的制冷剂回路

高温冷却回路中穿过双极板的制冷剂必须具有低电导率, 以避免短路。这是高温冷却回路通常使用含有防冻添加剂的去离子水作为冷却液的原因。为了避免这种液体从冷却通道泄漏, 建议按照 10^{-3} 至 10^{-4} 毫巴·升 / 秒 (0.1 至 0.01 标准立方厘米 / 分钟) 范围内的漏率限值进行泄漏检测。这是液体密封性的常用数量级, 因为这种尺寸的泄漏随后会被水本身密封。在双极板的流水生产中, 氦气真空检测法也是一种可选方法, 因其能够实现短生产周期和高吞吐量。在真空检测中, 冷却通道先被抽空, 再被充注氦气, 然后被重新密封。将待检测的双极板放入真空室并将真空室抽空后, 氦气检漏

试漏步骤	1	2	3	4	5	6
未阻止	氢漏向外	交叉漏 • 氢进入空气路 • 空气进入氢路	氢漏入冷却通道	空气漏向外	空气漏入冷却通道	冷却液漏向外
典型漏率	<ul style="list-style-type: none"> „尽可能低“ 典型值 10^{-3} ... 10^{-5} 毫巴·升/秒 某些版本要求 10^{-7} 毫巴·升/秒 					10^{-4} ... 10^{-3} 毫巴·升/秒

双极板检测中的检测场景。



燃料电池堆生产中的检测步骤。

仪（例如 INFICON LDS3000）检测从冷却通道逸出至真空室真空中的任何氦气。当然，每次结束检测过程后，都可对所用的氦气进行回收。

除了冷却液流经双极板的高温冷却回路之外，燃料电池电动汽车还有一个或多个低温冷却回路，其作用是使驱动装置、变频器和电源电子装置等电气部件的温度保持在低于 60 摄氏度的范围内。低温冷却回路通过传统的水 - 乙二醇混合液工作，也必须接受液体密封性检测。

6.3 双极板氢泄漏检测

对双极板进行氢泄漏检测时，也可使用真空法。为此，双极板的氢腔先被密封并抽空，然后被充注氦气。在抽空的真空室内，检漏仪（例如 LDS3000）随后可按照 10^{-6} 或 10^{-7} 毫巴·升 / 秒的漏率限值检测逸出的氦气。如果没有检测到氦气，则可以确定不会有氢从氢腔泄漏到外面或泄漏到冷却通道中。如果检测到泄漏，则可以进一步调查泄漏原因。这基于以下事实：在真空室中完成

初始检测后，双极板的氢腔中仍然充注有氦气并且密封。但是，此时，只有双极板的冷却通道连接至真空泵。这使 LDS3000 能够检测氦气是否进入冷却通道的真空中。如果没有，则最初检测到的泄漏是向外泄漏。

6.4 成品燃料电池堆的生产线末端检测

将双极板组装成成品燃料电池堆后，将执行生产线末端检测以发现可能的氢泄漏，虽然在前面的中间步骤完成后执行检测也可能有用。对组装好的双极板进行泄漏检测的典型漏率限值范围为 10^{-3} 至 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.005 标准立方厘米/分钟)。但是，前面已经讨论过，在个别情况下，漏率限值可以低至 10^{-7} 毫巴·升/秒。对组装好的燃料电池堆执行所有这些检测时，也可使用氦气作为示踪气体，这只是因为用氢检测会带来燃料电池意外开始工作并产生电能的风险。同样出于安全原因，不应使用氢作为示踪气体，因为氢回路出现粗漏可能迅速导致空气中的氢浓度超过 4%，从而产生可燃混合气。需要对燃料电池的介质分配板（它引导氢、空气和制冷

剂）及其各种阀、泵及其氢循环系统等部件进行额外的泄漏检测。由于氢和大气氧在双极板的膜电极处不会完全相互反应，因此，气体在经过水分离器后会在燃料电池中循环和再利用。同样，在理想情况下，应按照可达 10^{-6} 或 10^{-7} 毫巴·升/秒的尽可能低的漏率对输送氢的部件进行检测。

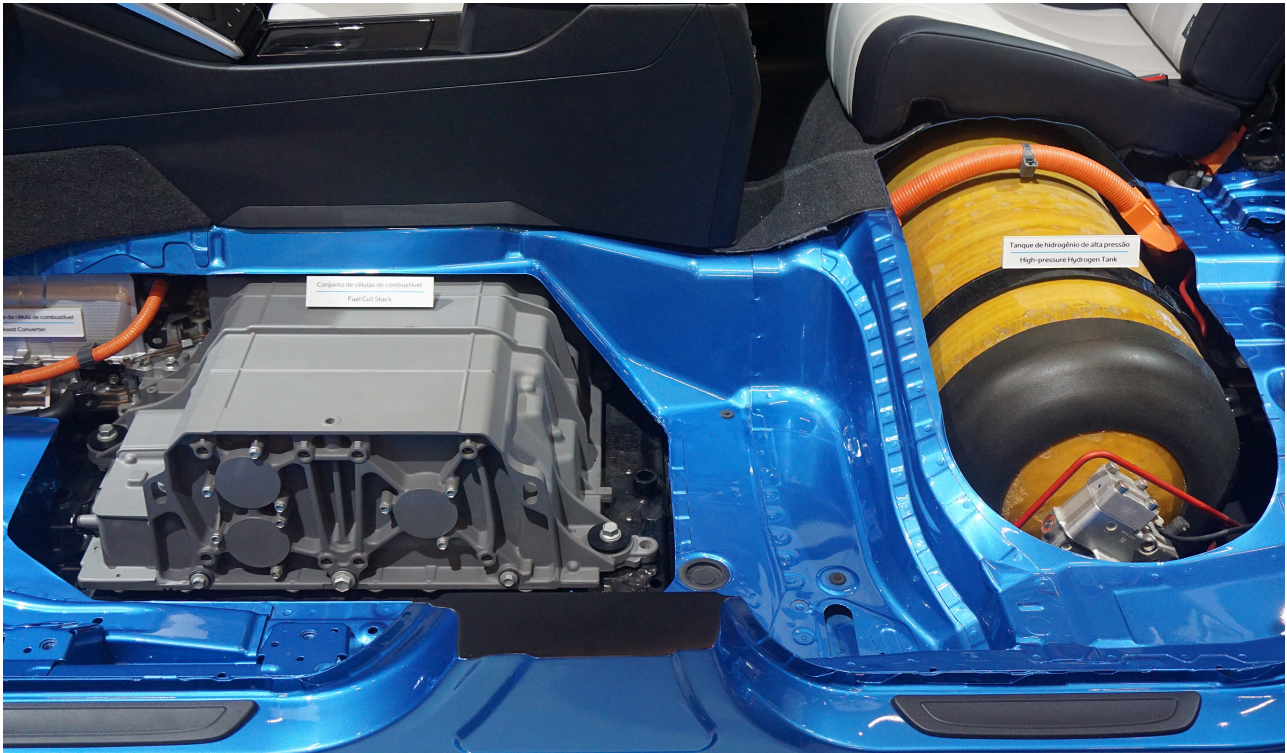


燃料电池堆吸枪检测。

7 储氢罐和氢管路

7.1 标准和渗透限值

燃料电池汽车上安装的储氢罐通常是由复合材料制成的所谓 IV 型储氢罐。这些加压罐的作用是能够随车携带更多氢气。IV 型储氢罐的强度通常由碳纤维结构来保证；这些储氢罐带有聚合物层内衬。乘用车的 IV 型加压储氢罐通常设计为最



丰田Mirai上安装的储氢罐。

高能够承受 700 巴 (或 10,153 磅 / 平方英寸) 的工作压力，客车上容积大得多的储氢罐则设计为最高只能承受 350 巴 (5,076 磅 / 平方英寸) 的工作压力。采用燃料电池的量产乘用车 (例如丰田 Mirai) 配备两个储氢罐，每个储氢罐的容积约为 60 升 (15.85 加仑)，氢动力客车使用的储氢罐容积则介于 1,300 至 1,700 升 (340 至 450 加仑) 之间。

燃料电池汽车储氢罐的密封性和漏率要求源于为这些储氢罐规定最大渗透率的许多国际标准。例如，这些标准包括

ISO 15869 的 B.16、EU406-2010 的 4.2.12.3 和 ECE R134 的 5.3.3。

对于连续运行，ISO 15869 标准的 B.16 规定，压力为 350 巴 /5,000 磅 / 平方英寸时 (客车的典型条件) 时，氢气渗透率应小于每升储氢罐容积每小时 2 立方厘米。压力为 700 巴 /10,000 磅 / 平方英寸时 (即对于乘用车储氢罐)，渗透率可为每升储氢罐容积每小时 2.8 立方厘米。

EU406-2010 标准的 4.2.12.3 规定，在连续运行期间，渗透率必须小于每升储氢罐容积每小时 6 标准立方厘米。

ECE R134 标准的 5.3.3. (c) 规定，如果测得的渗透率大于 0.005 毫克 / 秒 (相当于 3.6 标准毫升 / 分钟 = 3.6 标准立方厘米 / 分钟)，则需要进行局部泄漏检测，以确保任何单个漏点处的总值不超过 0.005 毫克 / 秒 (3.6 标准毫升 / 分钟 = 3.6 标准立方厘米 / 分钟)。

7.2 漏率基于渗透率

储氢罐的渗透率应等于其泄漏检测所用的漏率。因此，对于容积为 30 升 (约 8 加仑)，压力为 700 巴 (约 10,000 磅 / 平方英寸) 的乘用车储氢罐，根据 ISO 15869 的 B.16 所规定渗透率限值换算得到的氢气漏率限值为 $2.3 \cdot 10^{-2}$ 毫巴 · 升 / 秒 (1.4 标准立方厘米 / 分钟)。储氢罐容积相同但压力只有 350 巴 (约 5,000 磅 / 平方英寸) 时，漏率限值甚至更低，只有 $1.6 \cdot 10^{-2}$ 毫巴 · 升 / 秒 (1 标准立方厘米 / 分钟)。对于容积为 30 升 (约 8 加仑) 的乘用车储氢罐，EU406-2010 标准的 4.2.12.3 规定漏率限值等于 $5 \cdot 10^{-2}$ 毫巴 · 升 / 秒 (3 标准立方厘米 / 分钟)。根据 ECE R134 标

准的 5.3.3. (c)，最大容许漏率限值最终为 $6 \cdot 10^{-2}$ 毫巴 · 升 / 秒 (3.6 标准立方厘米 / 分钟)。

然而，事实上，储氢罐不仅要按照这些标准 —— 因此漏率限值在 10^{-2} 毫巴 · 升 / 秒 (1 至 3 标准立方厘米 / 分钟) 的范围内 —— 甚至还要按照 10^{-3} 毫巴 · 升 / 秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米 / 分钟) 范围内的漏率进行检测。这是因为储氢罐制造材料的实际渗透率通常比标准所要求的低一个数量级。

7.3 储氢罐累积检测

只有将所需的配件和阀连接至储氢罐时，原来的罐体才成为所谓的罐模块。使用氢气进行真空泄漏检测以及使用合成气体进行累积检测这两种方法都适用于罐体的初步检测。由于目前生产中的部件数量通常没有那么多，因此值得进行更复杂的真空检测，因其生产周期更短；累积检测目前发挥更重要的作用。这尤其适用于客车上的大型储氢罐。它们的容积通常可达 1,700 升，并

电子书

电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

在容积可达 4,000 升的累积室中进行检测。为了降低示踪气体成本，这样的试件中充注成本较低的合成气体，但压力为 700 巴 (约 10,000 磅 / 平方英寸)。这种两倍大的工作压力也适用于爆破试验 (但事先要用水执行)。但是，高示踪气体压力也是累积检测的必要条件，否则无法在相当大的累积室中检测到明显更低的漏率。由于高检测压力，累积室中有一个在压力过大时会打开的紧急出口。

7.4 储氢罐真空检测

无论对吞吐量较高的客车储氢罐还是对容积较小的乘用车储氢罐进行密封性检测，通常也都可以使用氦气真空检测法。但是，对于客车的大型储氢罐，这还需要进行泵组方面的相应投资，以便能够快速抽空大容积真空室，从而实现相较于累积检测的基本速度优势。由于真空

室本身必须比简单的累积室更防漏，因此无法在真空室安装紧急出口。相反，必须为真空室配备一个安全罩，以防止在储氢罐爆炸时造成损坏。然而，由于真空法的灵敏度一般，可显著降低示踪气体中的氦气浓度，或者为试件充注比工作压力更低的压力，这两种做法都可减少氦气的使用。同时，检测必须参照的漏率限值也会降低。例如，如果示踪气体中的氦气浓度降至 1%，则漏率限值要求相应地增加两个数量级：检测储氢罐所用的漏率限值应为 $5 \cdot 10^{-4}$ 毫巴·升 / 秒 (0.03 标准立方厘米 / 分钟)，而不是 $5 \cdot 10^{-2}$ 毫巴·升 / 秒 (3 标准立方厘米 / 分钟)。

7.5 配备所有配件的成品储氢罐的吸枪检漏

即使将罐体与所有配件 (充注阀和出口阀以及压力传感器) 组装到一起后，仍需执行泄漏检测。但是，此时通常使用



储氢罐配件吸枪检漏。

电子书

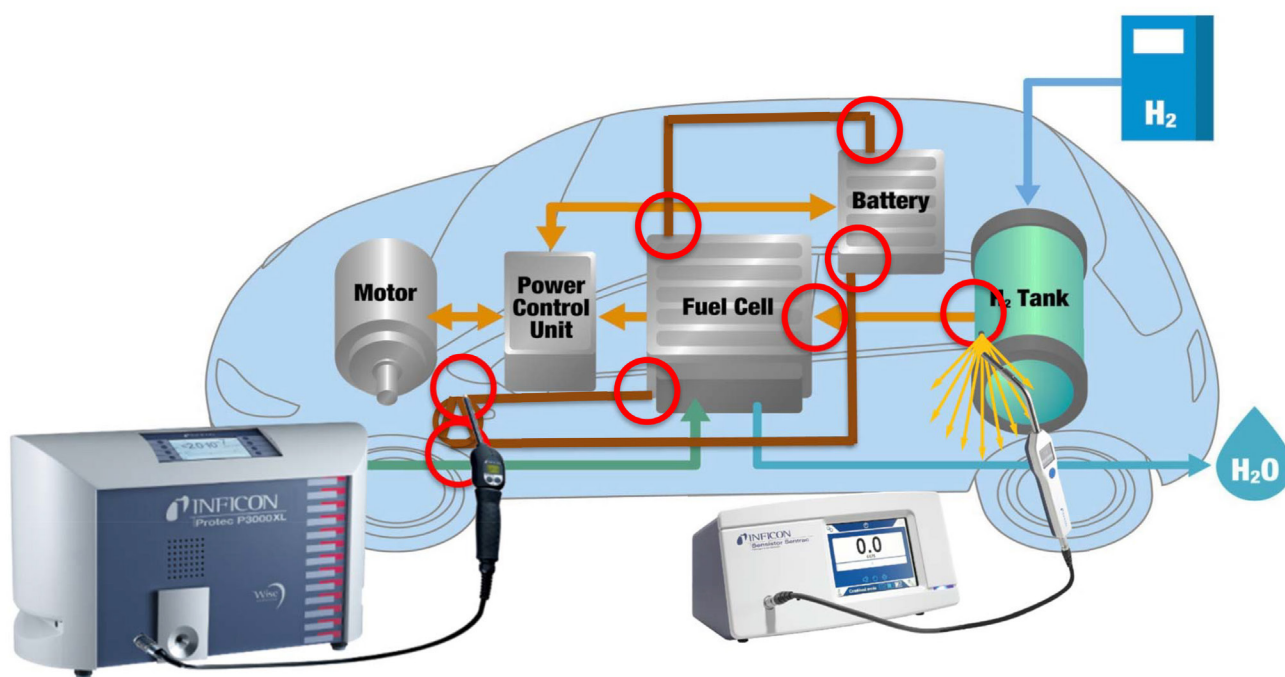
电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

所谓的吸枪检漏法。为试件（即成品储氢罐）充注示踪气体（氦气或合成气体）并密封。然后沿着储氢罐表面（整个表面或集中于问题点）移动吸枪探尖。

吸枪检漏基本上分为手动吸枪检漏和自动机器人吸枪检漏。在后一种情况下，经过编程的机械臂代替检测人员引导吸枪探尖在试件表面上方移动。如“[技术点 2: 为什么高气体流量在机器人吸枪检漏中至关重要](#)”所

述，气体流量发挥决定性的作用，尤其是在连续移动吸枪探尖进行动态吸枪检漏时。INFICON 检漏仪（例如 Protec P3000XL 和 XL3000flex）使用高达 3000 标准立方厘米 / 分钟的气体流量工作——它们专门开发用于执行快速机器人检漏。成品储氢罐的这些生产线末端检测（可使用氦气或合成气体执行）的典型漏率限值范围为 $5 \cdot 10^{-2}$ 毫巴·升 / 秒（3 标准立方厘米 / 分钟）。

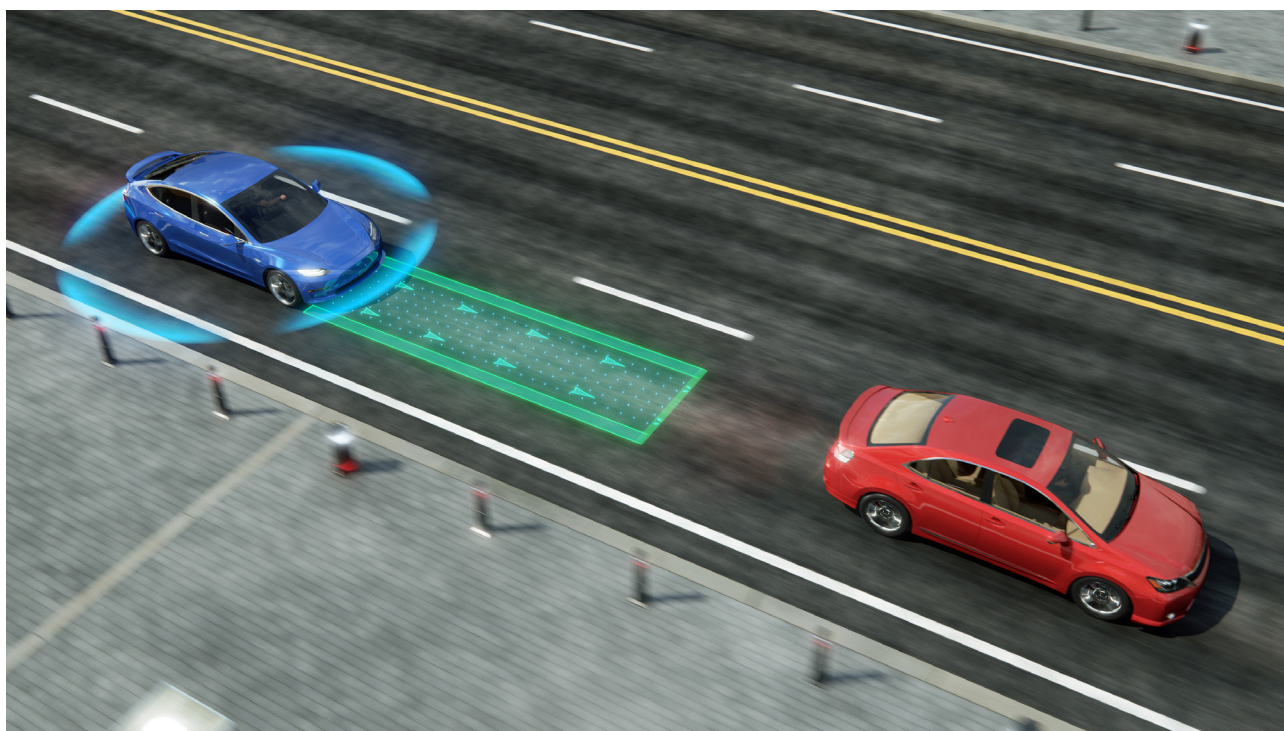


在车辆中安装部件期间的泄漏检测。

8 电气部件和电子部件

就其本质而言，水是车辆中所有电气部件和电子部件的主要“敌人”。因此，这些部件壳体的水密性是一项重要要求——通常要确保其符合防护等级 IP67 的要求。壳体材料与执行检测必须参照的漏率限值的最终要求之间的密切关系已在“[技术点 1: IP67 —— 壳](#)

[体材料决定漏率限值](#)”中做过介绍。除了对壳体水密性（对车辆的电源控制单元和电子模块至关重要）的一般要求之外，对电机的冷却回路也有防漏要求。另一方面，对于高级驾驶自动化系统 (ADAS)，为了长期确保功能可靠性，除了其他因素之外，该系统的传感器也必须具备气密性。



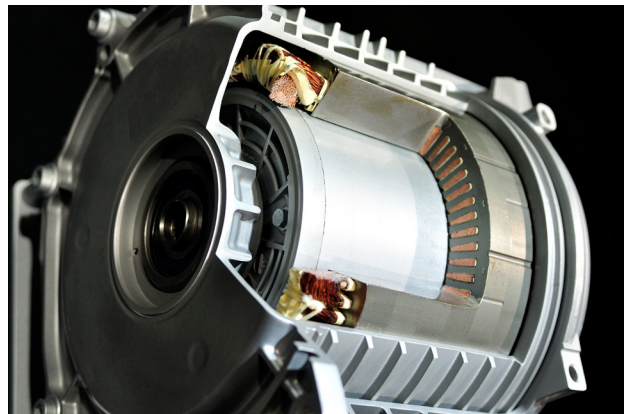
自动或半自动驾驶需要功能可靠的环境传感器。

8.1 传感器和控制模块

到目前为止，传感器泄漏检测通常采用灵敏度较低且与温度密切相关的压力衰减法。在压力衰减检测期间，温度升高将隐藏潜在的漏点，而温度降低将导致误识别漏点和假警报。然而，随着对自动驾驶汽车需求的增加，对 ADAS 系统可靠性及其雷达（无线电探测和测距）和激光雷达（光探测和测距）传感器密封性的要求也越来越高。对 ADAS 而言，百万分之 3.4 的缺陷率是不可想象的。ADAS 部件制造商遵循零缺陷策略——可靠性提高了 1000 倍。因此，采用雷达或激光雷达技术的传感器必须兼具水密性和气密性才能防止湿气渗入其中。这意味着需要使用其他检漏法。因此，制造商使用氦气真空检测法按照 10^{-6} 至 10^{-7} 毫巴·升/秒范围内的漏率对其雷达和激光雷达传感器进行检测。氦气真空检测法也可用于将电缆送入壳体内部的玻璃导孔。

当外部温度变化（例如季节性变化）时，控制模块通常通过 Gore-Tex® 防水膜进行压力补偿。在这种情况下，基于示踪气体的累积法用于保证质量。控制模块首先用超压最高可达 100 毫巴的氦气加压，以使示踪气体穿过薄膜渗入控制模块中。随后，氦气可通过任何漏点再次逸出并进入具有轻微负压的累积室，并在那里累积。这样便可以检测到泄漏。

8.2 电驱动电机



电动汽车的电驱动电机。

配备非传统驱动装置的所有汽车最终都使用电机。必须对这些驱动电机进行检测，既要确保水不会从外面进入，又要确保充水冷却夹套中的水不会泄漏到外面或泄漏到电机中。即使在正常使用车辆期间，电机也会因环境影响（例如下雨）或高压清洗机的水射流（例如在洗车装置中）而暴露于水中。因此，壳体必须满足防护等级 IP67 至 IP69 的要求。由此需要按照 10^{-3} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米/分钟) 范围内的漏率限值检测塑料或钢制壳体，按照 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘米/分钟) (压差为 100 毫巴) 的漏率限值检测要求更高的铝制壳体。

此外，越来越多的电机采用主动水冷系统来使电机保持恒定的理想温度，从而使其以最高效率运行。冷却液通常为水-乙二醇混合液。水冷夹套的密封性非常重要，必须防止水渗入电机的电气部件并引起短路。然而，与此同时，冷却液也不得从回路中漏出并损失。电驱动电机冷却水回路防漏要求的典型漏率限值在 10^{-3} 毫巴·升/秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米/分钟) 的范围内。

8.3 电机壳体真空或累积检测

由于冷却水回路中的部件设计用于快速传热，因此，泄漏检测方法（例如空气或压力衰减法）大部分都是过度的，因为它们对温度波动过于敏感。这也是使用基于示踪气体的方法完成这些任务的原因。

为了检测电机壳体的水密性，适合钢或塑料等材料的不仅有氦气真空检测法，累积法也同样适用，除了氦气之外，累积法也使用由 5% 的氢气和 95% 的氮气组成的不可燃混合气（即所谓的合成气体）作为示踪气体。合成气体的成本比氦气更低，简单累积室的成本也低于真空室。在累积检测中，壳体先被抽空，再被充注约 5 巴（壳体的最大容许压力）的示踪气体，然后被封闭。充有示踪气体的壳体被放入累积室中，通过漏孔逸出的任何示踪气体都累积于此，并且能够被检漏仪（例如 INFICON LDS3000 AQ）检测到。累积室中示踪气体浓度逐渐增加的速度是漏率的一种量度。但是，对于必须按照 10^{-5} 毫巴·升/秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘

米 / 分钟) (压差为 1000 毫巴) 范围内的漏率限值进行检测的铝制壳体，建议使用真空法检测泄漏。与累积法相比，虽然真空法更加复杂，但也具有灵敏度更高以及能够缩短生产周期的优势。

8.4 水冷夹套泄漏检测

水冷夹套的泄漏检测步骤与电机外壳相同。唯一的区别是，只有水冷夹套的腔被充注约 2 至 3 巴 (或最大容许压力) 的示踪气体。由于漏率要求取决于材料，因此，可使用累积法检测钢和塑料壳体，既可使用氦气，又可使用合成气体。此时的漏率限值为 10^{-3} 毫巴 · 升 / 秒 (0.1 至 0.5 标准立方厘米 / 分钟)。要求更高的铝制壳体则需要在真空室内使用氦气按照 10^{-5} 毫巴 · 升 / 秒 (0.001 至 0.005 标准立方厘米 / 分钟) (压差为 1000 毫巴) 范围内的漏率限值进行检测。

9 关于INFICON

INFICON 是泄漏检测仪器和设备开发、生产和销售领域的领军公司之一。INFICON 泄漏检测设备在要求严苛的工业生产和质量控制过程中使用。INFICON 泄漏检测仪适合各种各样的泄漏检测应用。INFICON 的主要客户是 RAC 行业、汽车行业、半导体行业的制造商和服务公司，以及泄漏检测系统制造商。凭借其在泄漏检测领域的多年经验，INFICON 现在还通过获得专利的 Contura S400 包装检漏仪为食品行业提供支持。



目前，INFICON 在泄漏检测技术方面已经拥有 50 多年的丰富经验。INFICON 通过在科隆（德国）、巴尔策斯（列支敦士登）、林雪平（瑞典）、锡拉丘兹（美国）和上海（中国）的生产设施以及在所有主要工业化国家的销售办事处和不断扩大的销售合作伙伴网络进行全球销售。2020 财年，INFICON AG 及其约 1100 名员工实现了约 3.98 亿美元的全球销售额。INFICON 的记名股票 (IFCN) 在瑞士证券交易所 SIX Swiss Exchange 交易。

10 有关汽车部件泄漏检测的其他信息来源

10.1 有关具体泄漏检测任务的文件系列

INFICON 提供描述如何在生产期间对具体的汽车部件高效进行泄漏检测的大量文件。您可以通过此了解有用的漏率、合适的方法以及如何执行检测。该**文件系列**中的所有 PDF 均可从 INFICON 网站免费下载。

您可以选择：

电芯



<https://bit.ly/361sG4i>

电池包



<https://bit.ly/3x5XXyH>

电驱动
电机



<https://bit.ly/360IWT6>

燃料电池的
双极板



<https://bit.ly/2TbdYF4>

10.2 到INFICON学院进修



我们的 INFICON 学院旨在为您培养合格的员工。我们希望通过各种研讨班帮助您提高泄漏检测的效率。我们全面的[研讨班课程](#)在设计时特意遵循制造商中立原则。我们将教授泄漏检测的基础知识，提供常见测量方法的概述，并介绍不同行业中的各种应用。

多样化的研讨班课程包括有关以下几方面的具体活动：

- » 电池和电动汽车泄漏检测
- » 燃料电池和燃料电池汽车泄漏检测
- » 机器人检测系统

在 INFICON 学院，您所学到的专业知识将帮助您为具体的应用选择适当的检测方法，充分发挥您所用检测方法和检测设备的潜力，尤其是在制造新汽车部件时。

向我们的专家学习：成为泄漏检测领域的专业人才！

电子书

电动交通：

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

11 联系方式

INFICON China

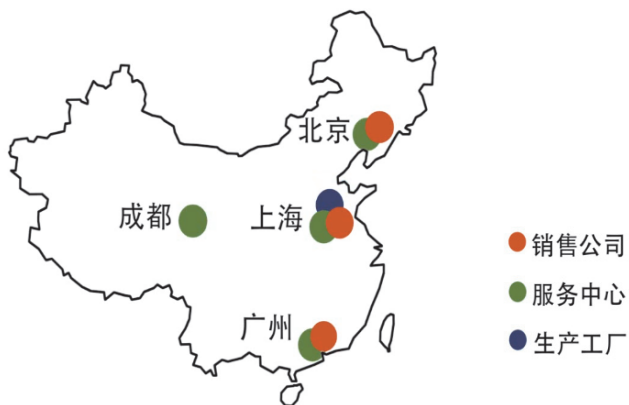
电话: 021-62093094

电子邮件: reach.china@inficon.com

Internet: www.inficonautomotive.com



INFICON 在中国的工作人员，
通过电话帮助客户



电子书

电动交通:

电动汽车和燃料电池汽车泄漏检测

法律声明

发布: INFICON GmbH, 科隆 (www.inficon.com)

编辑和排版: Möller Horcher Kommunikation GmbH, Offenbach和Freiberg

(www.moeller-horcher.de)

© INFICON 2020版权所有

图片版权拥有者

封面图片	Shutterstock © buffaloboy	第17、19、20页	INFICON
第5页	Shutterstock © Apiguide	第21页	INFICON/WorldArtsMe © gulfy/ Can Stock Photo © pix2go/Can Stock Photo © teshimine/Can Stock Photo © Makhnach
第6页	Wikimedia Commons © Tokumeigakarinoaoshima		
第8页	INFICON/ 德国亚琛工业大学、PEM	第22、23、25页	INFICON
第9页	INFICON	第27页	INFICON /Shutterstock © SasinTipchai
第10页	Shutterstock © Kondrachov Vladimir	第28、29、31页	INFICON
第11页	INFICON	第32、33、34页	INFICON
第12页	INFICON/Can Stock Photo © panambapro/ Clipart Library 1376954	第35页	Shutterstock © metamorworks
	INFICON	第36页	Shutterstock © Sergii Chernov/INFICON
第14页	INFICON	第37页	Shutterstock © Polina Krasnikova/INFICON
第15页	INFICON/WorldArtsMe © gulfy Clipart Library 1376954/ Can Stock/Photo © Makhnach/ Can Stock Photo © pix2go/Can Stock Photo © konstantinks/ WorldArtsMe © gulfy	第38页	INFICON/INFICON
	INFICON/Can Stock Photo © konstantinks/Clipart Library 1376954/Can Stock Photo © Makhnach/Can Stock Photo © pix2go/Can Stock Photo © konstantinks	第39、40页	INFICON
		第41页	Wikicommons
		第43页	INFICON
		第44页	Shutterstock © metamorworks/INFICON
第16页		第45页	Shutterstock © temp-64GTX
		第46页	Shutterstock © loraks
		第49、50页	INFICON