

本文引用格式：张儒锋,唐露新,王勇煌,等.基于氦气质谱法的动力电池包热管理模块密封性检测系统[J].自动化与信息工程, 2024,45(2):45-49.

ZHANG Rufeng, TANG Luxin, WANG Yonghuang, et al. Sealing detection system for thermal management module of power battery pack based on helium mass spectrometry[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(2): 45-49.

基于氦气质谱法的动力电池包热管理模块 密封性检测系统*

张儒锋¹ 唐露新² 王勇煌¹ 余迪超¹ 姜德志¹ 李波¹ 马镇华¹

(1.广州阿普顿自动化系统有限公司, 广东 广州 510530

2.广州理工学院/广东省工业机器人集成与应用工程技术研究中心, 广东 广州 510540)

摘要: 根据动力电池包热管理模块密封性检测要求, 提出一种基于氦气质谱法的动力电池包热管理模块密封性检测系统。为避免氦气泄露污染, 先利用低氦进行大漏粗检, 再利用氦气进行精检; 通过氦气回收和氮气清扫等工艺, 降低检测成本, 提高检测可靠性; 采用双真空箱交替工作模式, 提高检测效率。经实验验证, 最小检测漏率小于 1.5×10^{-6} mbar·L/s, 满足动力电池包热管理模块密封性检测要求。

关键词: 氦气质谱法; 泄漏检测; 电池包热管理模块; 真空箱

中图分类号: TB42

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)02-0008-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.02.008

Sealing Detection System for Thermal Management Module of Power Battery Pack Based on Helium Mass Spectrometry

ZHANG Rufeng¹ TANG Luxin² WANG Yonghuang¹ YU Dichao¹
JIANG Dezhi¹ LI Bo¹ MA Zhenhua¹

(1.Upton Automation Systems (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510530, China

2.Guangzhou Institute of Science and Technology/Guangdong Industrial Robot Integration and
Application Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510540, China)

Abstract: According to the sealing inspection requirements of the thermal management module of the power battery pack, a sealing inspection system for the thermal management module of the power battery pack based on helium mass spectrometry is proposed. To avoid helium leakage pollution, first use low helium for large leakage rough inspection, and then use helium for fine inspection; By using processes such as helium recovery and nitrogen cleaning, the cost of testing is reduced and the reliability of testing is improved; Adopting a dual true empty box alternating working mode to improve detection efficiency. Through experimental verification, the minimum detection leakage rate is less than 1.5×10^{-6} mbar·L/s, which meets the sealing detection requirements of the power battery pack thermal management module.

Keywords: helium mass spectrometry; leak detection; battery pack thermal management module; vacuum chamber

0 引言

近年来, 电动汽车自燃事故时有发生, 主要原因是动力电池包热失控。目前, 动力电池包一般利用液

体实现热交换, 而动力电池包热管理模块主要实现液冷系统中流体的汇流和切换功能。动力电池包热管理模块采用铸铝工艺, 内部管路之间、管路和外界之间

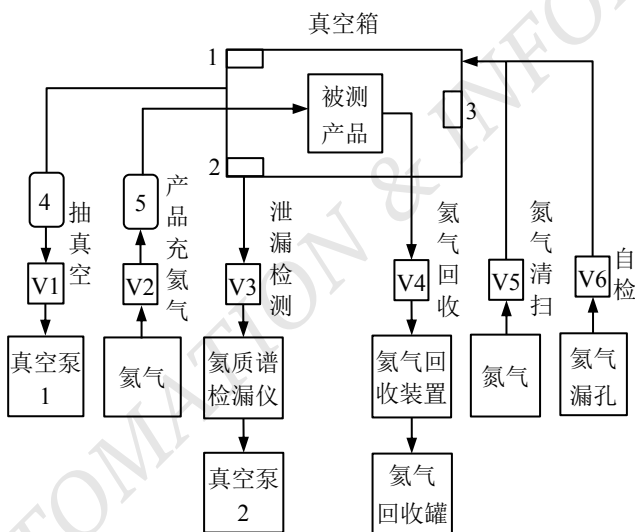
均不能产生泄露，否则可能引起电池短路。因此，对动力电池包热管理模块的密封性能要求极高，需要高精度的密封性检测系统对其进行工艺检测^[1-3]。

动力电池包热管理模块密封性检测系统通常采用空气检测法^[4]。其中，常规的压氦式检测法已较为成熟，但主要对密封性产品进行检测，批量检测效率较低^[5-6]。氦气是惰性气体，在常温常压下无色无味，不易与其他物质发生反应，且密度小于空气密度，易从细微气孔中渗出，适合高精度的气密性检测^[7-9]。

本文采用氦气质谱法（也称氦示踪法）^[10-13]进行动力电池包热管理模块的密封性检测，通过粗检、精检 2 步检测，使检测结果更加准确可靠；具有氦气回收、氦气清扫功能，提高氦气利用率，减少氦气残留对检测结果的影响；具有自检功能，通过标准氦气漏孔对氦质谱检漏仪进行自校，保证检测结果的准确性。

1 系统原理

基于氦气质谱法的动力电池包热管理模块密封性检测系统（以下简称密封性检测系统）工作原理如图 1 所示。



1—箱盖开启位移传感器；2—箱盖关闭位移传感器；3—产品感应传感器；4—真空规（真空度传感器）；5—压力传感器；V1~V6—电磁阀。

图 1 密封性检测系统工作原理示意图

密封性检测系统主要包括泄漏检测、氦气回收、氦气清扫 3 个气路，其中泄漏检测是核心气路，其检

测过程为：

1) 打开真空箱（箱盖开启位移传感器监测箱盖是否完全打开），将被测产品放入真空箱，并与氦气接口连接；产品感应传感器感应到被测产品后，关闭真空箱（箱盖关闭位移传感器监测箱盖是否完全关闭）；

2) 打开 V1 电磁阀，通过真空泵 1 对真空箱抽气，当真空规监测到真空箱内的绝对压力小于 20 Pa 时，关闭 V1 电磁阀；

3) 粗检，打开 V2 电磁阀，向被测产品短暂充氦气 0.5 s 后，迅速关闭 V2 电磁阀；

4) 打开 V3 电磁阀，利用氦质谱检漏仪检测真空箱内的氦气漏率，并根据氦气漏率判断被测产品是否存在大漏，如果存在大漏，则终止检测，否则，关闭 V3 电磁阀继续进行精检；

5) 精检，打开 V2 电磁阀，向被测产品充入氦气，当压力传感器检测充入被测产品的氦气压力达到指定检测压力后，关闭 V2 电磁阀；

6) 打开 V3 电磁阀，通过氦质谱检漏仪检测真空箱内氦气漏率，并根据氦气漏率判断被测产品的密封性；

7) 关闭 V3 电磁阀，打开 V4 电磁阀，通过氦气回收装置回收充入被测产品的氦气；

8) 打开 V5 电磁阀，向真空箱通入氦气进行清扫后，打开真空箱，取出被测产品，检测完成；

9) 当怀疑检测结果数据不可靠时，可通过氦气漏孔进行自检。关闭真空箱，打开 V1 电磁阀，利用真空泵 1 对真空箱抽气，当真空规监测到真空箱内的绝对压力小于 20 Pa 时，关闭 V1 电磁阀；打开 V3 和 V6 电磁阀，通过对比氦质谱检漏仪的检测数据与氦气漏孔的标称漏率是否一致，判断检测结果数据的准确性。

2 系统结构

密封性检测系统主要由显示单元、氦质谱检漏仪、真空泵、真空箱、配电箱、氦气瓶等组成，如图 2 所示。

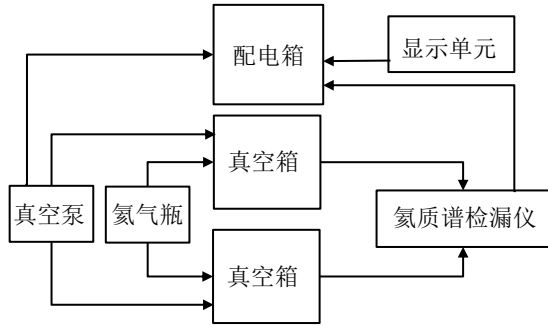


图2 密封性检测系统结构框图

图2中，2个真空箱代表2个检测工位。当其中一个真空箱检测完成，处于清扫阶段时，氦质谱检漏仪切换到另一个真空箱，对箱内的产品进行检测；此时处于清扫阶段的真空箱完成清扫，人工取出产品，再继续放置被测产品。这样不仅提高了氦质谱检漏仪的利用率，还提高了检测效率。

为提高密封性检测系统的性能，对真空箱进行特殊设计和工艺加工：箱体、箱盖均采用不锈钢厚板制作，不易变形，焊接处的表面粗糙度 $Ra \leq 0.3 \mu\text{m}$ ；箱体与水平面成 20° 倾斜角，方便放入、取出被测产品，并可加速清理真空箱内残留的氦气；箱盖采用压紧气缸，通过平移式压紧设计，保证箱盖密封性良好。

另外，氦质谱检漏仪应远离真空泵等震动源，放置位置低于真空箱，避免清扫真空箱时，残留氦气上升，污染氦质谱检漏仪。

3 系统电控部分

密封性检测系统电气控制逻辑框图如图3所示。

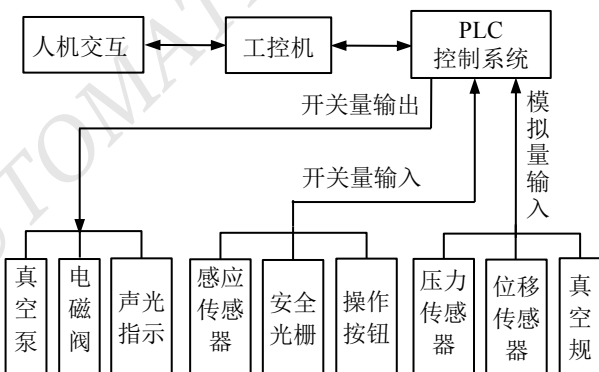


图3 密封性检测系统电气控制逻辑框图

密封性检测系统的工控机具有程序操作界面、参数显示、数据保存等功能；PLC控制系统通过接收或发送信号来控制密封性检测系统。PLC开关量输出包括3个真空泵（抽真空、泄漏检测和氦气回收）、电磁阀、声光指示（指示密封性检测系统的工作状态和异常信息）；开关量输入包括感应传感器、安全光栅（监测检测过程中操作人员或其他物品是否进入装置）、操作按钮（启动、停止、保持和急停等）；模拟量输入包括压力传感器、2个位移传感器、真空规。

4 软件部分

密封性检测系统软件采用 LabVIEW 编写，程序流程图如图4所示。

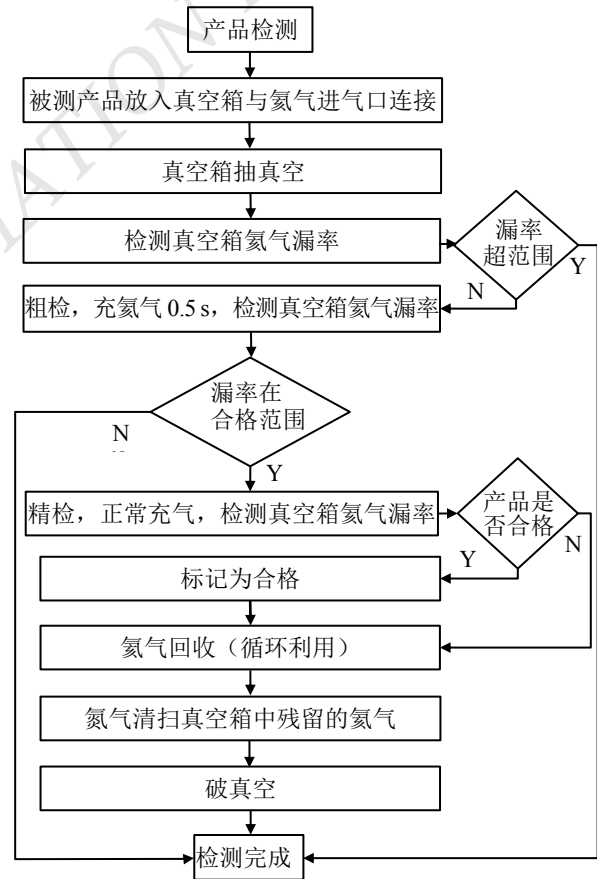


图4 密封性检测系统程序流程图

5 实验验证

5.1 实验要求与环境

本实验在真空箱内进行，环境温度为 25°C ，空

气湿度为 50%RH。测试时间为 60 s，其中抽真空时间为 30 s；粗检的预充气时间为 0.5 s，大漏检测时间为 4 s；精检的被测产品充气时间为 1 s，被测产品氦气压力检测时间为 1 s，被测产品泄漏检测时间为 9 s；氦气回收时间为 5 s，氦气清扫时间为 9.5 s。动力电池包热管理模块要求最小检测漏率为 1×10^{-5} mbar·L/s。

为验证密封性检测系统的性能，将动力电池包热管理模块的泄露检测实验分为 2 组：一组为合格的动力电池包热管理模块，另一组为合格的动力电池包热管理模块和漏率为 1.5×10^{-6} mbar·L/s 的氦气漏孔，其中氦气漏孔用于模拟被测产品泄漏。

5.2 实验结果

实验 1 被测产品为合格的动力电池包热管理模块，进行 15 次检测，检测数据如表 1 所示。

表 1 实验 1 检测数据

次数	漏率数据/(mbar·L/s)	结果
1	0.000 000 078 86	合格
2	0.000 000 079 14	合格
3	0.000 000 077 63	合格
4	0.000 000 074 61	合格
5	0.000 000 069 27	合格
6	0.000 000 075 31	合格
7	0.000 000 070 94	合格
8	0.000 000 076 28	合格
9	0.000 000 071 09	合格
10	0.000 000 080 26	合格
11	0.000 000 072 88	合格
12	0.000 000 067 80	合格
13	0.000 000 075 21	合格
14	0.000 000 058 71	合格
15	0.000 000 056 07	合格

由表 1 可以看出：该合格动力电池包热管理模块的漏率很小，检测结果全部为合格。

重复性是指在重复性测量条件下的测量精密度，可通过贝塞尔公式（公式(1)）计算得到，其结果越接近 0，说明系统的测量精密度越高。

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中： S_x 为重复性， x_i 为第 i 次测量的数值， \bar{x} 为 n 次测量的平均值， n 为重复测量次数。

将表 1 的检测数据代入公式(1)，计算重复性 $S_x = 7.08 \times 10^{-9}$ ，其非常接近 0，说明本次检测数据非常接近，也说明密封性检测系统测量精密度较高。

实验 2 被测产品由实验 1 采用的合格动力电池包热管理模块和氦气漏孔组成，进行 15 次检测，检测数据如表 2 所示。

表 2 实验 2 检测数据

次数	漏率数据/(mbar·L/s)	结果
1	0.000 001 403	不合格
2	0.000 001 407	不合格
3	0.000 001 424	不合格
4	0.000 001 433	不合格
5	0.000 001 411	不合格
6	0.000 001 697	不合格
7	0.000 001 447	不合格
8	0.000 001 414	不合格
9	0.000 001 467	不合格
10	0.000 001 399	不合格
11	0.000 001 368	不合格
12	0.000 001 369	不合格
13	0.000 001 391	不合格
14	0.000 001 394	不合格
15	0.000 001 386	不合格

由表 2 可以看出：实验 2 被测产品的漏率约为 1.427×10^{-6} mbar·L/s（15 次检测结果的平均值），满足动力电池包热管理模块的密封性要求，密封性检测系统能够准确区分泄漏和不泄漏的产品。

将表 2 的检测数据代入公式(1)，计算重复性 $S_x = 7.9 \times 10^{-8}$ ，其非常接近 0，说明密封性检测系统在不同漏率下检测数据的重复性较好。

6 结论

基于氦气质谱法的动力电池包热管理模块密封

性检测系统采用粗检、精检 2 步检测方法, 实现自校准、人机交互等功能, 提高了密封性检测的速度和精度。经实验验证, 该密封性检测系统测试的重复性可达 7.08×10^{-9} mbar·L/s, 最小可检泄漏 1.427×10^{-6} mbar·L/s, 满足动力电池包热管理模块最小检测漏率 1×10^{-5} mbar·L/s 的要求。但该系统目前只能检测泄漏的总量, 无法判断被测产品泄漏的位置, 还需优化改进。

参考文献

- [1] 邹晓辉. 电动汽车动力电池热管理液冷系统设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [2] 李欣, 胡淼, 连正秋. 集成式水冷动力电池结构设计及热管理分析[J]. 新技术新工艺, 2021(2): 36-39.
- [3] GIULIANO M R, ADVANI S G, PRASAD A K. Thermal analysis and management of lithium-titanate batteries[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(15): 6517-6524.
- [4] 万许东. 新能源汽车电源系统 IP68 气密性检测方法的研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
- [5] 李雍斌, 李怀洲. 基于汽车新能源电池的密封测试[C]//2015 中国汽车工程学会年会论文集 (Volume3), 2015-10, 中国上海: [出版社不详], 2015: 430-432.
- [6] 印松. 基于 LabVIEW 的动力电池密封性测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2018(4): 72-75.
- [7] 邹伟琦, 覃京翎, 王莉莉, 等. 汽车零部件气密性检测技术国内外发展现状综述[J]. 科技视界, 2018(29): 49-50; 18.
- [8] 周锡文. 汽车零部件气密性检测技术国内发展现状综述[J]. 内燃机与配件, 2021(6): 116-117.
- [9] 毛芹, 王涛, 王军茹, 等. 气密性检测技术现状和典型方法[C]//Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of the 2011 International Conference on Future Computer Science and Application (FCSA 2011 V3). 北京理工大学自动化学院, 2011: 4.
- [10] 黄文平, 王成智. 基于氦质谱测漏仪下的测漏技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(4): 98-99.
- [11] 何己有. 氦质谱检漏仪检测原理及应用[J]. 聚酯工业, 2011, 24(2): 54-57.
- [12] 周兆剑. 氦气检漏技术在汽车制动部件中的应用[J]. 汽车零部件, 2013(11): 29.
- [13] 江翠翠, 王佐勋. 氦气示踪检测法在气密性检测系统中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2020, 34(3): 74-80.

作者简介:

张儒锋, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 密封性测试技术。E-mail: 13560240622@163.com

唐露新, 男, 1958 年生, 硕士研究生, 教授, 主要研究方向: 仪器科学与技术、智能控制、光机电一体化。E-mail: tangluxin@21cn.com

王勇煌, 男, 1985 年生, 专科, 主要研究方向: 密封性测试技术。E-mail: wang.yh@upton.cn

余迪超, 男, 1985 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 密封性测试技术与自动化技术。E-mail: yu.dc@upton.cn

姜德志, 男, 1977 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 密封性测试技术。E-mail: jdz@upton.cn

李波, 男, 1979 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 密封性测试技术。E-mail: libo@upton.cn

马镇华, 男, 1992 年生, 专科, 助理工程师, 主要研究方向: 密封性测试技术与计量校准。E-mail: ma.zh@upton.cn

(上接第 33 页)

[6] 郭朕. STM32CubeIDE 官方免费集成开发环境初探[J]. 电子世界, 2020(13): 9-10.

[7] ST. STM32CubeIDE 快速入门指南[EB/OL]. [2024-04-23]. https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00598966-

stm32cubeide-quick-start-guide-stmicroelectronics.pdf.

[8] 邹志强, 何玉定. 基于 QT 的步进电机加速曲线生成工具的研究与实现[J]. 广东工业大学学报, 2017, 34(6): 83-87.

作者简介:

赵旭, 男, 1975 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 嵌入式系统应用及工业自动化现场应用。E-mail: yonlone@163.com