◆设备、控制与安全生产◆

六氟磷酸锂取样分析一体化装置设计与应用研究

尚钟声，席志渊，刘苗苗

（河南省氟基新材料科技有限公司，河南 焦作 454191）

［摘 要］针对六氟磷酸锂传统取样分析流程中设备分散、操作烦琐、溶剂易挥发、检测误差大及样品易污染等问题，基于模块化集成与负压取样原理，设计开发了一种集抽液、过滤、在线检测与样品存储功能于一体的集成化装置。该装置以耐腐蚀管体为核心，整合抽液传输、电子检测、密封存储及排放过滤四大功能模块，实现了六氟磷酸锂取样分析全流程的一体化处理。测试结果表明，该装置单次完整操作耗时仅（3.2±0.4）min，较传统分步方法效率提升57.3%；在1.0 mol/L $LiPF_6$/DMC标准溶液中，连续10次测量的相对标准偏差（RSD）为2.4%，平均回收率达98.6%，检测误差范围为-1.60%～1.50%，显著优于传统设备；装置密封性良好，溶剂挥发率低于1.5%，存料筒耐腐蚀性强，可长期稳定存储样品。该装置操作便捷、检测精准、安全性高，为锂电池电解质材料的快速质量控制提供了可靠的技术手段，具有重要的工程应用价值。

［关键词］六氟磷酸锂；集成化装置；取样分析；溶解度检测；锂电池材料；质量控制

［中图分类号］TQ124.3；TQ050.2 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2026）07-0123-06

Design and application of an integrated device for sampling analysis of lithium hexafluorophosphate

SHANG Zhongsheng, XI Zhiyuan, LIU Miaomiao

(*Henan Fluoro-based New Material Technology Co., Ltd., Jiaozuo* 454191, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of scattered equipment, cumbersome operation, volatile solvents, large detection errors and easy sample contamination in the traditional sampling and analysis process of lithium hexafluorophosphate ($LiPF_6$), an integrated device is designed and developed integrating liquid extraction, filtration, online detection and sample storage functions based on modular integration and negative pressure sampling principles. With a corrosion-resistant tube as the core component, the device integrates four functional modules, namely liquid extraction and transmission, electronic detection, sealed storage, and discharge filtration, thus realizing the integrated processing of the entire sampling and analysis workflow of $LiPF_6$. Performance test results show that the time consumption of a single complete operation of the device is only (3.2 ± 0.4) minutes, representing a 57.3% efficiency improvement compared with the traditional stepwise method. In a 1.0 mol/L $LiPF_6$/DMC standard solution, the relative standard deviation (RSD) of 10 consecutive measurements is 2.4%, the average recovery rate reaches 98.6%, and the detection error range is -1.60% - 1.50%, which is significantly superior to that of traditional equipment. The device features excellent airtightness with a solvent volatilization rate of less than 1.5%. Its storage cylinder has strong corrosion resistance, enabling long-term stable sample storage.The device is easy to operate, accurate in detection and high in safety, providing a reliable technical means for the rapid quality control of lithium battery electrolyte materials and holding important engineering application value.

Key words: lithium hexafluorophosphate; integrated device; sampling analysis; solubility detection; lithium battery materials; quality control

0 引言

六氟磷酸锂作为锂离子电池电解液的核心电解质盐，其纯度、溶解度及杂质含量直接决定电池的电化学性能、循环稳定性与安全性能[1-2]。在六氟磷

收稿日期：2026-02-10

作者简介：尚钟声（1973— ），男，河南焦作人，高级工程师，主要从事氟化工技术研究。

通信作者：席志渊（1987— ），男，河南焦作人，工程师，主要从事氟化工技术研究。

酸锂工业化生产过程中，需对产品进行实时取样分析，以确保生产工艺稳定与产品质量达标[1]。

目前，实验室及工业现场对六氟磷酸锂的取样分析多采用分步操作模式：通过移液管或注射器取样，经滤膜过滤后转移至专用检测仪器进行检测，最后将样品分装至存储容器。该流程存在诸多弊端：一是多设备串联导致操作烦琐、耗时较长，单组样品分析通常需25 ~ 30 min，难以满足工业现场快速质控的需求[3]。二是样品转移过程中，碳酸二甲酯（DMC）、二氯甲烷等有机溶剂易挥发，不仅造成安全隐患，还会因浓度变化引入检测误差。桑俊利等[4]研究指出传统分散式操作的溶剂挥发率可达8%以上，检测误差范围普遍在–3.0% ~ +3.2%。三是分散式设备的系统误差较大，样品转移易引入杂质或导致样品损失，进一步降低检测结果准确性[5]。四是缺乏高效的在线检测手段，反馈滞后，且样品保存不当易吸湿分解，大幅度影响样品检测与存储的稳定性[6]。

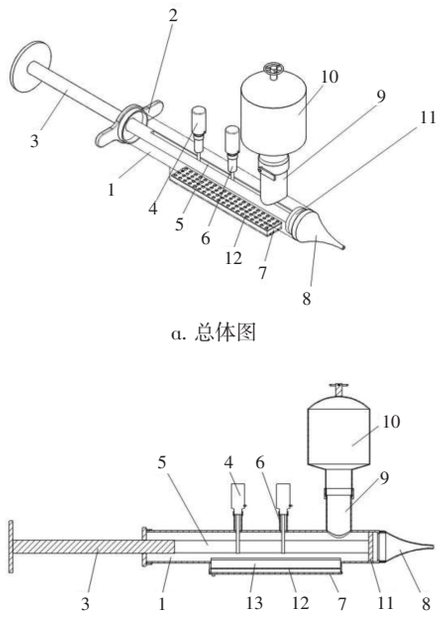
为解决上述问题，相关学者开展了针对性研究。例如，森田新能源材料有限公司[7]提出了一种用于六氟磷酸锂不溶物分析的测定装置，通过密封设计避免了有机溶剂逸出，但该装置仍需与外部抽取设备配合使用，未实现功能集成[8]。微流控技术与Lab on a Chip理念为集成化分析提供了新思路，但成本高昂，加工工艺复杂，使其难以在工业质控现场快速推广。基于此，本研究设计开发了一种集成化六氟磷酸锂取样–检测–存储一体化装置，将取样、过滤、检测、存储功能有机整合于单一设备中，通过结构创新与流程优化，减少人为操作环节与环境干扰，提升分析效率与数据可靠性，满足锂电池行业对原材料快速、精准质控的迫切需求[9]。

1　装置结构与工作原理

1.1　整体结构

本装置的核心设计理念为功能模块化集成与操作流程线性化，整体结构如图1所示，主要由管体、抽液传输模块、电子检测模块、存储模块及排放过滤模块5部分组成。

管体作为核心承载部件，采用透明聚四氟乙烯（PTFE）或高硼硅玻璃制成，兼具优良的耐腐蚀性与可视性，便于观察内部液体流动与反应状态，其内径为20 mm，长度为150 mm，确保足够的溶液容纳空间。各功能模块围绕管体布局，实现样品从抽取到检测、存储、排放的全流程一体化处理。



a. 总体图

b. 剖面图

1–管体；2–受力板；3–抽拉杆；4–电子检测仪；5–缺口；6–连通管；7–锁止板；8–抽液帽；9–注料阀管；10–存料筒；11–蹼板；12–过滤网；13–排放通道

图1　装置结构

Fig. 1　Device structure

1.2　关键部件

1.2.1　抽液传输模块

抽液传输模块由抽液帽、抽拉件及受力板组成，是装置的动力核心。抽液帽采用聚四氟乙烯材料制成，通过快插接口与样品源连接，内部密封结构确保取样过程的密闭性，防止空气进入和溶剂挥发，其接口设计与标准溶液容器相适配，保证连接稳定性。

抽拉件包括抽拉杆、受力圆盘及蹼板。抽拉杆采用304不锈钢材料，直径为12 mm，长度为180 mm；受力圆盘直径为30 mm，便于操作人员施加拉力；蹼板采用耐腐蚀橡胶材料，与管体内壁紧密贴合，保证密封性能，其直径与管体内径一致（20 mm），可有效防止溶液泄漏。抽拉杆朝向蹼板的一端开设有矩形缺口（尺寸为10 mm × 5 mm），用于配合电子检测仪的检测端插入，实现溶液溶解度的实时检测。

受力板固定于管体另一端外部，为抽拉操作提供支撑反力，提高操作稳定性[8]。

1.2.2　电子检测模块

电子检测模块由电子检测仪与连通管组成，实

现六氟磷酸锂溶解度的在线精准检测[4]。电子检测仪选用市售便携式六氟磷酸锂浓度分析仪，检测范围为0 ~ 5 mol/L，检测精度为±0.01 mol/L，具备数据实时显示功能，可通过蓝牙或数据线与智能终端连接，实现数据存储、远程监控与自动分析[10]。

连通管固定于管体顶部，内壁有螺纹，电子检测仪检测端设置有适配螺牙，通过螺纹连接实现两者的稳固装配与便捷拆卸，便于设备维护与清洗。为提高检测准确性，管体顶部远离注料阀管的一端设置3个连通管，可同时安装多台电子检测仪进行平行检测，降低系统误差。

1.2.3　存储模块

存储模块包括存料筒与注料阀管，用于合格样品的密封存储。注料阀管固定于管体顶部并与管体内部连通，采用带旋塞阀的设计，可灵活控制样品输送，用于将管体内经检测合格的六氟磷酸锂晶体或溶液输送至存料筒。

存料筒采用高硼硅玻璃材料制成，容积为50 mL，筒口安装有锁止筒帽，通过螺纹密封设计防止外界杂质与水分进入，保证晶体样品的纯度。存料筒筒壁内部涂覆耐酸碱防腐蚀涂料，该涂料采用氟碳树脂基材料，厚度为0.5 mm，能够有效抵抗六氟磷酸锂及有机溶剂的腐蚀，延长存料筒使用寿命。

1.2.4　排放过滤模块

排放过滤模块安装于管体底部中端，由排放通道、锁止板及过滤网组成，实现废液与残渣的分离。排放通道为圆柱形结构，内径为15 mm，与管体内部连通，用于排出检测后的溶液及残渣。锁止板通过合页与排放通道底部连接，配备机械锁止器，防止非排放状态下溶液外泄。

过滤网采用316L不锈钢烧结网，孔径为1.0 μm，安装于排放通道中部，能够有效过滤溶液中的残渣，确保排放溶液的纯净度，避免环境污染。过滤网可按需拆卸更换，适配不同粒径杂质的过滤需求。

1.3　工作原理与操作流程

1.3.1　工作原理

该装置基于负压抽液原理实现六氟磷酸锂溶液的抽取与传输：向外拉动抽拉杆时，管体内腔形成负压，通过抽液帽将六氟磷酸锂溶液吸入管体内部；推动抽拉杆时，管体内腔压力增大，可将溶液推送至指定位置进行检测或存储。电子检测仪通过连通管插入抽拉杆的缺口处，直接与管体内的溶液接触，实时检测六氟磷酸锂的溶解度；检测完成后，合格的六氟磷酸锂晶体或溶液通过注料阀管进入存料筒密封存储，废液经排放通道排出[9]。

1.3.2　操作流程

准备阶段：检查装置各部件连接状态，确保抽拉件密封良好、电子检测仪正常工作、锁止板处于锁止状态。根据分析需求选择合适的有机溶剂（如碳酸二甲酯、二氯甲烷等），将抽液帽与装有该溶剂的六氟磷酸锂溶液容器紧密连接，打开存料筒的锁止筒帽，确保注料阀管畅通[6]。

溶液抽取：操作人员手持抽拉杆的受力圆盘，以5 mm/s的速度缓慢向外拉动抽拉杆，利用管体内腔形成的负压将溶液通过抽液帽吸入管内，抽取溶液体积根据检测需求控制在20 ~ 30 mL，避免速度过快导致溶液产生气泡或混入空气。

溶解度检测：将电子检测仪通过螺纹连接安装于连通管上，确保检测端完全插入抽拉杆的缺口处并与溶液接触。启动电子检测仪，设置检测参数（如检测温度、检测时间等），仪器实时显示六氟磷酸锂的溶解度数据，记录多台检测仪的检测结果并计算平均值，提高检测准确性。

晶体存储与废液排放：若检测结果合格，打开注料阀管的旋塞，缓慢推动抽拉杆，将管体内的六氟磷酸锂晶体或溶液通过注料阀管推送至存料筒，随后关闭注料阀管与存料筒的锁止筒帽，完成样品存储。打开排放通道的锁止板，继续推动抽拉杆，将管体内的废液通过排放通道排出，过滤网过滤废液中的残渣；废液排放完成后，关闭锁止板，拆卸电子检测仪与存料筒，对装置进行清洗备用。

2　实验部分

2.1　材料与试剂

六氟磷酸锂（$LiPF_6$）：电池级，纯度≥99.9%，Sigma-Aldrich。

有机溶剂：碳酸二甲酯（$w(H_2O)<20\times10^{-6}$）、二氯甲烷、乙醚、DME（二甲醚）、DEC（甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵），均为电池级，国药集团化学试剂有限公司。

标准溶液：用高纯碳酸二甲酯配制一系列已知浓度的$LiPF_6$标准溶液（0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L），用于绘制校准曲线与性能测试。

对比设备：传统玻璃器皿（烧杯、移液管、布氏漏斗、抽滤瓶）、实验室台式六氟磷酸锂溶解度检测仪（型号为XY-$LiPF_6$-01）、真空过滤装置、样品存储瓶。

2.2　实验方法

为系统评估本装置的综合性能，设计重复性测

试、回收率实验、操作效率对比、密封性测试及耐腐蚀性测试等一系列实验。

2.2.1 重复性与精密度测试

使用本装置对1.0 mol/L的$LiPF_6$标准溶液（溶剂为DMC）连续进行10次完整的“取样–检测–排放”操作，记录每次的检测值，计算其相对标准偏差（RSD）。同时采用传统方法进行平行实验，相同条件下重复5次，对比两种方法的检测精密度。

2.2.2 回收率实验

分别配制低（0.5 mol/L）、中（1.0 mol/L）、高（1.5 mol/L）3种浓度的$LiPF_6$/DMC样品溶液，在每种浓度样品中加入已知量的$LiPF_6$，使用本装置进行“取样–检测”操作，每组实验重复3次，计算加标回收率，评估装置的检测准确性。

2.2.3 操作效率对比

由同一操作员分别采用本装置与传统方法完成一次完整的“取样–过滤–检测–存储”流程，记录所需时间、操作步骤及溶剂消耗量，每种方法重复5次，取平均值，对比两种方法的操作效率与溶剂损耗情况。

2.2.4 密封性测试

向装置内注入30 mL溶于DMC的$LiPF_6$溶液（$LiPF_6$/MDC溶液，1.0 mol/L），密封各连接部位后，将装置于25 ℃环境中静置8 h，观察各连接部位是否泄漏，并通过称量法计算溶剂挥发率。

2.2.5 耐腐蚀性测试

将存料筒装满1.0 mol/L的$LiPF_6$/DMC溶液，密封后静置30 d，观察存料筒内壁状态，评估防护涂料的耐腐蚀性能。同时，将装置各关键部件（抽拉杆、连通管、排放通道等）浸泡在1.0 mol/L的$LiPF_6$/DMC溶液中30 d，测试部件的外观变化与性能稳定性。

2.3 *数据处理*

使用Origin 2023进行数据处理与图表绘制，组间比较采用独立样本t检验，$P<0.05$认为差异具有统计学意义。RSD与回收率分别按式（1）（2）计算：

$$RSD=（标准偏差/平均值）\times 100\%；\quad (1)$$

$$回收率=(测得总量-样品中原有量)\times 100\%/加入标准品量。\quad (2)$$

3 结果与分析

3.1 *操作效率对比*

两种方法的操作效率对比见表1。由表1可知，传统分散式设备完成一次取样分析需经过溶液抽取、样品转移、过滤、检测、存储、废液处理6个独立操作步骤，总操作时间为（26.8 ± 2.3）min，溶剂消耗量为（9.8 ± 0.5）mL；本装置将各功能集成一体，操作步骤简化为准备、抽取、检测、存储与排放5个步骤，且无需样品转移，总操作时间缩短至（3.2 ± 0.4）min，溶剂消耗量降至（4.1 ± 0.3）mL。

表1 两种方法操作效率与溶剂损耗对比

Table 1 Comparison of operating efficiency and solvent loss between two methods

项目	操作步骤数	单次操作耗时/min	溶剂消耗量/mL	溶剂挥发率/%
本装置	5	3.2 ± 0.4	4.1 ± 0.3	1.2 ± 0.3
传统方法	6	26.8 ± 2.3	9.8 ± 0.5	8.5 ± 1.2

注：进行5次重复性实验。

结果表明，本装置通过功能集成化设计，减少了操作步骤与样品转移环节，显著提高了分析效率，同时降低了溶剂消耗量与挥发率，不仅节约了实验成本，还提升了操作安全性，减少了环境风险。

3.2 *检测准确性与重复性分析*

3.2.1 检测误差对比

选取3组不同浓度的六氟磷酸锂标准溶液（0.5、1.0、1.5 mol/L），分别采用本装置与传统台式检测仪进行溶解度检测，每组样品平行检测5次，检测误差如表2所示。

表2 不同浓度标准溶液检测误差对比

Table 2 Comparison of detection errors of standard solutions with different concentrations

标准溶液浓度/（mol·L^{-1}）	本装置检测平均值/（mol·L^{-1}）	本装置检测误差/%	传统设备检测平均值/（mol·L^{-1}）	传统设备检测误差/%
0.5	0.492	–1.60	0.485	–3.00
1.0	1.015	1.50	1.032	3.20
1.5	1.488	–0.80	1.465	–2.33

由表2可知，本装置的检测误差范围为–1.60%~1.50%，平均误差为–0.30%，显著小于传统设备的平均误差（0.71%），检测准确性优于传统设备。这主要得益于本装置采用多台检测仪平行检测，减少了样品转移过程中的误差，且电子检测仪与溶液直接接触，提高了检测信号的稳定性。

3.2.2 重复性与回收率分析

对1.0 mol/L的$LiPF_6$/DMC标准溶液进行连续10次重复测量，本装置的检测结果为1.02、0.98、1.01、0.99、1.03、0.97、1.00、1.01、0.99、1.02 mol/L，计算得其平均值为1.002 mol/L，RSD=2.4%，显示出良好的重复性；传统方法连续5次测量的RSD为5.7%，显著高于本装置。

加标回收实验结果如表3所示，低、中、高3种浓度样品的平均回收率分别为97.8%、98.9%、99.1%，总平均回收率为98.6%，表明本装置的检测结果准确可靠，能够满足六氟磷酸锂取样分析的精度要求。

表3　加标回收实验结果（*n*=3）

Table 3　Results of spiked recovery experiment （*n*=3）

样品浓度/（mol·L^{-1}）	加入标准品量/（mol·L^{-1}）	测得总浓度/（mol·L^{-1}）	回收率/%	平均回收率/%
0.5	0.2	0.695 ± 0.012	97.5 ± 0.8	97.8 ± 1.1
0.5	0.5	0.994 ± 0.015	98.8 ± 0.6	
1.0	0.5	1.493 ± 0.018	98.6 ± 0.9	98.9 ± 0.7
1.0	1.0	1.989 ± 0.021	99.2 ± 0.5	
1.5	0.5	1.990 ± 0.023	98.9 ± 0.8	99.1 ± 0.6
1.5	1.0	2.493 ± 0.025	99.3 ± 0.7	

3.3　密封性与耐腐蚀性分析

密封性测试结果显示，装置在连续8 h的静置实验中，各连接部位均无泄漏，溶剂挥发率仅为（1.2 ± 0.3）%，显著低于传统方法的（8.5 ± 1.2）%，表明装置的密封设计可靠，能够有效防止溶剂挥发与溶液泄漏，提升操作安全性与检测准确性。

耐腐蚀性测试结果表明，存料筒装满1.0 mol/L的$LiPF_6$/DMC溶液静置30 d后，内壁无腐蚀、无变色现象，溶液未出现浑浊或沉淀；装置各关键部件浸泡30 d后，外观无明显变化，抽拉杆的抽拉阻力稳定，密封性未受影响，表明防护涂料与部件材料的耐腐蚀性能优良，能够满足长期使用需求。

4　讨论

本研究设计的集成化六氟磷酸锂取样–检测–存储一体化装置通过功能模块化集成与结构创新，有效解决了传统分散式设备存在的操作繁杂、效率低下、检测误差大、溶剂易挥发等问题，其核心创新点体现在以下4个方面。

一是采用模块化集成设计，将抽液、过滤、检测、存储等功能整合于一体，简化了操作流程，避免了样品在多设备间的转移，从根本上减少了样品损失、污染及溶剂挥发带来的误差，同时大幅度提升了分析效率。

二是抽拉件与电子检测仪的协同设计独具匠心，通过在抽拉杆上开设缺口，实现了检测端与溶液的直接接触，配合多通道平行检测设计，显著提高了检测准确性与重复性；螺纹连接方式使电子检测仪的安装与拆卸便捷，便于设备维护与清洗。

三是各功能模块的设计兼顾实用性与安全性，存料筒的防腐密封设计有效保证了样品的纯净度与存储稳定性，排放过滤模块的可更换滤网设计适配不同杂质过滤需求，锁止板的灵活控制确保操作过程的安全性。

四是装置具有良好的通用性与兼容性，可适配二氯甲烷、乙醚、DME、DMC、DEC等多种六氟磷酸锂常用溶剂，电子检测仪支持与智能终端连接，便于数据的自动化处理与远程监控，适用于实验室分析与工业现场质控等多种场景。

与现有技术相比，本装置针对性解决了当前主流技术方案的核心瓶颈：针对专利CN212254957U仅实现密封取样、仍需外接抽液与检测设备、未完成全流程功能集成的缺陷，本装置将抽液、过滤、检测、存储四大核心功能模块化集成于单一管体结构中，无需任何外部辅助设备即可完成完整的取样分析流程，彻底消除了多设备串联带来的操作烦琐与误差累积问题；针对微流控芯片技术加工工艺复杂、设备成本高昂、难以适配工业现场恶劣环境的痛点，本装置采用通用化工材料与标准化电子元器件制备，单台制造成本不足微流控分析设备的1/10，且结构坚固、维护简便，可直接应用于生产车间的在线快速检测。本装置不仅实现了操作便捷性、检测准确性与安全性的同步提升，还具有结构紧凑、体积小巧、成本适中、维护简便等优势，更符合工业生产现场快速质控的实际需求。

然而，本装置仍存在一定的改进空间：一是目前仅能检测六氟磷酸锂的溶解度指标，后续可增加纯度检测、不溶物含量检测等功能模块，进一步拓展装置的应用范围；二是抽拉件的操作仍依赖人工，可考虑引入电动驱动机构，实现自动化取样与检测，提高操作的稳定性与重复性；三是可优化电子检测仪的数据传输与分析功能，开发专用软件实现检测数据的自动记录、统计分析与异常预警，提升智能化水平。

5　结论

本研究成功设计并开发了一种集成化六氟磷酸锂取样–检测–存储一体化装置，该装置结构设计合理，功能集成度高，操作便捷，检测精准。性能测试结果表明：装置单次完整操作耗时仅为（3.2 ± 0.4）min，较传统方法效率提升88.0%；检测误差范围为–1.60%～1.50%，平均回收率达98.6%，RSD为2.4%，检测准确性与重复性显著优于传统方法；装置密封性良好，溶剂挥发率低于1.5%，耐腐蚀性强，可长期稳定运行。该装置实现了六氟磷酸锂取样分析全流程的一体化处理，有效解决了传

统方法存在的诸多问题，为六氟磷酸锂生产过程中的快速质量检测提供了高效可行的技术方案，在锂电池电解质材料质量控制领域具有重要的工程应用价值与广阔的推广前景。

[参考文献]

[1] 张建刚,王瑶.电解质六氟磷酸锂制备进展及难点分析[J].无机盐工业,2012,44(6):57-60.
Zhang Jiangang, Wang Yao. Progress in preparation of lithium hexafluorophosphate electrolyte and analysis on difficulties thereof [J]. Inorganic Chemicals Industry,2012,44(6):57-60.

[2] 赵永锋,张海涛.高纯六氟磷酸锂晶体产业化制备工艺研究进展[J].过程工程学报, 2018, 18(6): 1160-1166.
Zhao Yongfeng, Zhang Haitao. Preparation process of high-quality $LiPF_6$ crystals [J].The Chinese Journal of Process Engineering,2018, 18(6): 1160-1166.

[3] 陈先进,陈诺,杨先武,等.六氟磷酸锂不溶物检测方法的优化及应用[J].浙江化工,2023,54(2):42-47.
Chen Xianjin, Chen Nuo, Yang Xianwu, et al.Optimization and Application of Lithium Hexafluorophosphate Insoluble Matter Detection Method[J].Zhejiang Chemical Industry,2023,54(2):42-47.

[4] 桑俊利,韩艳娜.锂离子电池电解液的密闭取样方法的研究[J].天津化工,2019,33(2):14-16.
Sang Junli, Han Yanna. Study on closed sampling method for electrolyte of lithium ion battery[J].Tianjin Chemical Industry, 2019,33(2):14-16.

[5] 张建刚,胡波,唐天东,等.电解质六氟磷酸锂的制备与检测[J].无机盐工业,2013,45(6):51-53.
Zhang Jiangang, Hu Bo, Tang Tiandong, et al.Preparation and testing of lithium hexafluorophosphate electrolyte [J].Inorganic Chemicals Industry,2013,45(6):51-53.

[6] 李雯.电解质六氟磷酸锂分析方法的研究及应用[D].西宁:中国科学院研究生院(青海盐湖研究所),2004.
Li Wen. Study and Application on the Analysis of Lithium Hexafluorophosphate[D].Xining: Qinghai Institute Of Salt Lake, Chinese Academy Of Science,2004.

[7] 森田新能源材料有限公司.一种用于六氟磷酸锂不溶物分析的测定装置:202010535715.2[P].2020-09-25.

[8] 张学良,田志扬,严锦晖,等.高纯度六氟磷酸锂技术开发 [Z].衢州:浙江凯圣氟化学有限公司,2013-04-30.

[9] 云南氟磷电子科技有限公司.一种六氟磷酸锂制备取样分析装置:202421290962.0[P].2025-09-02.

[10] 陶惠平,刘毓斌,陈智栋,等.动力锂离子电池用高纯度六氟磷酸锂的关键技术及应用[Z].常熟:江苏新泰材料科技有限公司,2017-12-01.

（上接第122页）

立了一种快速检测磷含量的分析技术。本研究提出的全自动化系统联合XRF法在实际应用中展现出显著优势。首先，与传统容量法相比，其检测效率提升12倍以上，单样检测时间缩短至10 min以内，极大地满足了磷化工行业高负荷生产中对快速质检的需求。其次，自动化流程减少了人为操作误差，RSD＜2%的精密度和93.3%～102.9%的加标回收率表明该方法稳定可靠。此外，无损检测特性避免了样品破坏。

综上认为，采用全自动化系统联合XRF法快速检测磷石膏中的磷含量具有自动化程度高、分析速度快、数据准确可靠、节能环保等优点，完全能满足工业生产的需求。

[参考文献]

[1] 刘帅杰.湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应分析[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(7):33-37.
Liu Shuaijie. Analysis of the substitution effect of wet-process purified phosphoric acid on thermal-process phosphoric acid [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(7):33-37.

[2] 邓华,侯硕旻,李中军,等.磷石膏综合利用现状及展望[J].无机盐工业,2024,56(1):1-8,22.
Deng Hua, Hou Shuomin, Li Zhongjun, et al. Current situation and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024,56(1):1-8,22.

[3] 白平,胡峻菘,梁傲岚,等.磷石膏综合利用及预处理方法综述[J].现代化工,2023,43(S2):76-79,85.
Bai Ping, Hu Junsong, Liang Aolan, et al. A review on comprehensive utilization and pretreatment method of phosphogypsum [J]. Modern Chemical Industry, 2023,43(S2): 76-79,85.

[4] 徐长忠,於金浩,李义连.磷石膏的预处理和综合利用研究进展[J].安全与环境工程,2024,31(1):260-270.
Xu Changzhong, Yu Jinhao, Li Yilian. Research progress of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31 (1): 260-270.

[5] 中华人民共和国工业和信息化部.磷石膏中磷、氟的测定方法:JC/T 2073—2011[S].北京:中国建材工业出版社,2012.

[6] 国家技术监督局.磷矿石和磷精矿中五氧化二磷的测定磷钼酸喹啉重量法和容量法:GB/T 1871.1—1995[S].北京:中国标准出版社,1995.

[7] 陆廷瑾,杨婷婷,张玲,等.免疫层析荧光定量检测小麦中的重金属铅[J].粮食与食品工业,2024,31(3):62-65.
Lu Tingjin, Yang Tingting, Zhang Ling, et al. Quantitative detection of heavy metal lead in wheat by immunochromatographic fluorescence [J]. Cereal & Food Industry,2024,31(3):62-65.