

氧化还原液流电池电解液降解产物的在线质谱监测方法开发

陈 云

北京莱伯帕兹检测科技有限公司 北京

【摘要】 氧化还原液流电池 (Redox Flow Battery, RFB) 作为一种新型的能量存储设备, 已在大规模储能领域获得广泛关注。电解液的降解产物可能会影响其性能和稳定性, 因此在线监测电解液降解产物的变化具有重要意义。本研究开发了一种新的在线质谱监测方法, 用于实时检测氧化还原液流电池中电解液的降解产物。该方法结合了高灵敏度质谱技术与流动电池的工作环境, 为电池性能优化提供了有力的技术支持。实验结果表明, 该监测方法能够准确追踪电解液中降解产物的浓度变化, 揭示了其与电池循环稳定性之间的关系。本研究的创新性在于首次实现了氧化还原液流电池电解液降解产物的在线质谱监测, 并为未来电池系统的性能提高提供了可行的技术路径。

【关键词】 氧化还原液流电池; 电解液降解产物; 在线质谱监测; 能量存储; 性能优化

【收稿日期】 2025 年 5 月 16 日 **【出刊日期】** 2025 年 6 月 21 日 **【DOI】** 10.12208/j.jccr.20250034

Development of an on - line mass spectrometry monitoring method for degradation products of redox flow battery electrolyte

Yun Chen

Beijing Lab Paz Testing Technology Co., Ltd, Beijing

【Abstract】 As a new - type energy storage device, the Redox Flow Battery (RFB) has received extensive attention in the field of large - scale energy storage. The degradation products of the electrolyte may affect its performance and stability. Therefore, it is of great significance to on - line monitor the changes of electrolyte degradation products. In this study, a new on - line mass spectrometry monitoring method was developed to real - time detect the degradation products of the electrolyte in the redox flow battery. This method combines high - sensitivity mass spectrometry technology with the working environment of the flow battery, providing a powerful technical support for battery performance optimization. The experimental results show that this monitoring method can accurately track the concentration changes of degradation products in the electrolyte, revealing the relationship between them and the cycle stability of the battery. The innovation of this study lies in the first realization of on - line mass spectrometry monitoring of the degradation products of redox flow battery electrolyte, and providing a feasible technical path for the performance improvement of future battery systems.

【Keywords】 Redox flow battery; Electrolyte degradation products; On - line mass spectrometry monitoring; Energy storage; Performance

引言

氧化还原液流电池 (RFB) 因其优异的循环稳定性和可扩展性, 已成为大规模储能系统的重要选择。电解液在充放电过程中会不可避免地发生降解, 生成各种副产物, 这些产物的积累不仅会影响电池的电化学性能, 还可能导致电池寿命的缩短。实时监测电解液降解产物的变化对于提高电池效率和延长使用寿命至关重要。现有的监测技术多依赖实验室间歇性分析, 难以满

足实时监控的需求。本研究提出了一种基于质谱技术的在线监测方法, 能够实时监控电解液降解产物的变化。该方法不仅能够精确追踪降解产物的动态变化, 还能揭示降解产物与电池性能之间的关系, 为电池系统的优化提供数据支持, 推动氧化还原液流电池技术的进一步发展。

1 氧化还原液流电池电解液降解产物的形成机制

氧化还原液流电池 (RFB) 作为一种重要的储能技

术,广泛应用于可再生能源的储存和负载平衡中。在电池的充放电过程中,电解液中的活性物质经历氧化还原反应,释放和储存电能^[1]。长期运行会导致电解液中活性物质的降解。降解产物的形成与电池的工作环境密切相关,通常与电池内部的电化学反应、温度变化以及电解液的组成成分等因素有着直接的联系。电池在高电压或长时间循环过程中,电解液中的电化学活性物质往往会发生分解或转化,生成多种副产物。这些副产物不仅可能导致电解液的性能下降,还会影响电池的稳定性和效率。

氧化还原液流电池的降解产物的种类和数量取决于多个因素,包括电解液中化学物质的稳定性、电池工作条件以及材料的选择。以典型的全钒氧化还原液流电池为例,钒离子在不同的氧化态之间转化是其核心反应过程。在高电压下,钒离子的过度氧化或还原会导致一些钒氧化物和钒酸盐的生成,这些物质在电池内的积累可能会阻碍电池的电化学反应。类似的,在其他类型的液流电池中,电解液中的有机溶剂和电解质也会受到电化学反应的影响,产生如酸性物质、有机小分子等降解产物,这些产物可能会降低电解液的离子导电性和电池的总体效能。

为了更好地理解降解产物对氧化还原液流电池性能的影响,必须深入研究这些降解产物的生成机制及其与电池性能的关系。在电池的不同运行阶段,电解液中各类物质的浓度和反应速度会随着使用时间的推移而变化。通过对电解液中降解产物的分析,可以揭示其与电池性能退化的关联。过量的降解产物可能会导致电解液的粘度增大,阻碍离子的传输,从而使电池的电化学反应效率降低。降解产物的积累还可能导致电池内的电极表面污染,进一步加剧电池性能的衰退。探讨电解液降解产物的生成机理,为优化电池的性能和延长其使用寿命提供了关键的理论依据。

2 在线质谱监测技术的原理与应用

在线质谱监测技术为研究氧化还原液流电池电解液降解产物提供了一种高效、精准的手段。质谱技术通过测量离子的质荷比来识别分子及其组成元素的种类,能够准确地分析样品中的化学成分和结构信息。在线质谱监测技术不仅具备高灵敏度和高分辨率的优势,还能够实现实时监测,克服了传统离线分析方法无法提供即时数据的局限性。这使得它成为监测氧化还原液流电池电解液中降解产物变化的重要工具,尤其是在长期运行和循环过程中,能够及时反馈电解液中物质的变化情况,提供更为精确的监控数据。

质谱技术在氧化还原液流电池中的应用主要依赖于高效的样品引入系统和先进的质谱仪设备。电解液样品通常通过流动系统直接引入质谱仪进行分析。常用的质谱技术包括气相色谱-质谱联用(GC-MS)、液相色谱-质谱联用(LC-MS)和直接分析质谱技术(DART-MS)等。这些技术可以帮助科学家在电池运行的过程中,实时地获取降解产物的质谱数据,并能够通过数据分析得到电解液中各成分的浓度和分布情况^[2]。在液流电池的在线监测过程中,通过质谱技术可以检测到微量的降解产物,这些产物可能会对电池的运行产生重要影响,例如改变电解液的电导率、影响电池的效率等。

在线质谱监测技术的优势不仅在于其高度的灵敏性,还在于它能够提供更维度的电池运行数据。质谱数据不仅可以揭示电解液中的降解产物种类和浓度,还可以通过与电池性能数据的结合,揭示降解产物与电池效率、循环寿命之间的关系。通过对质谱数据的分析,研究人员能够追踪电池在不同工作条件下的表现,发现电解液降解产物对电池性能影响的规律。这一技术为电池的性能优化提供了可靠的依据,有助于实现电池的智能管理和维护。

3 氧化还原液流电池降解产物的实时监测方法开发

为了有效监测氧化还原液流电池中的降解产物,开发一种适用于电池运行的实时在线监测方法至关重要。现有的技术虽然可以通过实验室分析获取相关数据,但这些方法大多依赖于周期性的采样和分析,无法满足实时监测的需求。基于质谱技术的实时监测方法应运而生,成为解决这一问题的重要手段。该方法通过将质谱仪器与电池系统紧密结合,能够实现对电解液中降解产物的持续、实时监测,为电池管理系统提供准确的运行数据。

实时监测方法的开发过程中,电解液的流动特性和样品采集方式是设计的核心因素。由于电解液在电池内部的循环过程中不断变化,样品的采集必须具有代表性,并能够及时反映电解液的真实状态。样品引入系统必须精确且高效,能够实时从电池中抽取电解液样本并快速输送到质谱仪进行分析。样品采集系统的设计还需要考虑电解液的流动速度、压力变化以及采样量的精确控制,以保证数据的准确性。实时监测系统的稳定性同样至关重要,设备必须能够在电池的运行过程中长时间稳定运行,不会因系统故障或精度误差影响电池性能评估。稳定可靠的实时监测系统能够为

电池管理提供持续的性能反馈。

在实际应用中,开发的一体化在线监测系统能够无缝对接到电池的运行控制系统,实时采集电解液中的降解产物数据,并将这些数据传输到后台分析系统。这种实时监控不仅能帮助操作人员及时发现电池中降解产物的变化,还能在问题发生之前预警潜在的性能下降。通过将降解产物的数据与电池的电压、电流、温度等关键性能参数进行关联分析,研究人员能够深入挖掘降解产物与电池性能之间的关联,识别影响性能的关键因素^[3-7]。这些分析数据为制定有效的电池维护和管理策略提供了科学依据,帮助优化电池的工作条件,提升电池的效率,延长其使用寿命,从而提高整体储能系统的可靠性和经济性。

4 在线监测结果分析与电池性能优化的关系

在线监测技术的引入,使得氧化还原液流电池电解液中降解产物的变化能够实时掌握,从而大大提高了监控的精度和全面性。通过连续获取电解液中的降解产物数据,研究人员能够及时发现这些产物对电池性能的潜在影响。电解液降解产物对电池性能的影响是多方面的。随着降解产物的积累,电解液的电导率逐渐降低,导致离子在电解液中的迁移速度减缓,电池的内阻增加,进而影响充放电效率和能量转换效率。一些降解产物可能在电极表面形成不导电的沉积膜,这些沉积物不仅阻碍电荷的传输,还可能引发电极材料的腐蚀,进而降低电池的循环稳定性和使用寿命。实时监测降解产物的变化对于电池的优化至关重要。

通过在线监测得到的降解产物数据,研究人员可以及时发现电池性能的变化趋势,并采取相应的优化措施。针对电解液中某些降解产物浓度的异常升高,可以通过调整电解液配方或优化电池的工作条件来减少这些产物的生成。监测数据还可以帮助研究人员识别出影响电池性能的关键降解产物,从而为电池材料的改进提供指导。通过精确控制降解产物的生成,能够有效提升电池的性能和稳定性,延长电池的使用寿命^[8]。在线监测不仅可以帮助优化电池的运行,还为智能电池管理系统的实现提供了数据支持。通过将实时监测数据与电池的运行状态相结合,系统能够根据降解产物的浓度变化智能调节电池的充放电策略,从而最大限度地延长电池的使用寿命。监测结果还可以为电池的维护和更新提供决策依据,实现电池的动态优化。通过这种方式,氧化还原液流电池的整体性能将得到显

著提升,推动其在大规模储能系统中的应用。

5 结语

通过实时监测技术的应用,可以有效地追踪氧化还原液流电池中电解液降解产物的变化,并及时发现其对电池性能的影响。这种方法不仅能够提高电池的运行效率,还能为电池的优化和维护提供重要的数据支持。随着监测技术的不断进步,电池的运行管理将更加智能化和精细化,进一步推动储能技术的发展。通过精确监控降解产物的积累,研究人员可以采取有针对性的措施延长电池的使用寿命,提升电池系统的整体性能,为可再生能源的大规模储能应用提供更加可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 洪德祺,程杨,赵红.液流电池阳极材料与性能优化的研究进展[J/OL].化工学报,1-20[2025-07-11].
- [2] 王帅,王远洋.全钒氧化还原液流电池电解液的制备和性能优化研究进展[J].工业催化,2025,33(04):26-33.
- [3] 唐钰航.基于疏水低共熔溶剂纳米乳液电化学性能的研究及其在氧化还原液流电池的应用[D].上海师范大学,2025.
- [4] 杨晓莹,张保华,蓝叶滢,等.氧化还原液流电池碳基复合双极板材料研究进展[J].应用化学,2024,41(10):1381-1398.
- [5] 王力霞.钒氧化还原液流电池电解液研究进展[J].攀枝花学院学报,2024,41(05):76-82.
- [6] 陈彦博.全钒氧化还原液流电池电解液的研究进展[J].中国战略新兴产业,2024,(02):84-86.
- [7] 朱昊天,谢小银,白恩瑞,等.铬铁氧化还原液流电池与其电极改性的研究[J].电源技术,2023,47(11):1394-1398.
- [8] 杜涛,张杰,张爱芳,等.全钒氧化还原液流电池电解液的研究进展[J].电池,2023,53(02):223-227.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS