

液流电池双极板关键技术与经济效益分析

文明哲（开封时代新能源科技有限公司，河南 开封 475000）

摘要：液流电池是一种具有巨大潜力的储能技术，双极板的性能极大的决定液流电池的性能。本文详细介绍目前液流电池使用双极板的作用、类型、材料特性、制造工艺以及性能评估方法，并深入探讨当前研究面临的挑战和未来的发展趋势。通过对相关研究的综合分析，为液流电池双极板的进一步发展和优化提供参考。

关键词：储能；液流电池；双极板；经济效益；效益分析

0 前言

能源是各国人民经济发展的重要物质基础，未来国家的命运将受到能源控制和分配的显著影响。在我国，风能、太阳能等可再生能源的发电设备制造技术已经相当成熟，但是储能技术^[1]发展的并不是很顺利。

目前，按照已经实现实用化的大规模储能技术进行划分，可以主要分类为物理储能和电化学储能两种。物理储能技术主要有压缩空气储能^[2]和抽水储能^[3]，这两种储能系统具有规模大、寿命长、安全可靠和运行费用低等优点。

主要的应用工程有2021年山东肥城10MW盐穴先进压缩空气储能国家示范电站项目，2022年河北张家口100MW先进压缩空气储能国家示范电站，2023年河南1200MW天池抽水储能电站。而电化学储能主要包括有锂离子电池^[4]、液流电池^[5]、铅炭电池^[6]和钠基电池^[7]等电池储能技术，这些电池具有系统简单、安装方便和运行方式灵活等独特优点。液流电池储能技术是通过正极和负极的活性物质价态变化来实现电能的存储与释放。

目前，液流电池的种类繁多，其中全钒液流电池^[8]和锌基液流电池因其采用无机电解质具有安全，可以充放电上千次，无污染和容量易复原的特点，有巨大的市场应用前景。双极板^[9]作为液流电池的关键组件之一，对电池的性能、成本和寿命发挥着至关重要的作用。

1 液流电池特点

液流电池通过其正极电解液和负极的电解液活性物质之间的可逆氧化还原反应，实现电能与化学能的相互转换。在充电过程中，正极发生氧化反应，导致活性物质的价态上升；而负极则发生还原反应，电解液活性物质的价态降低。放电过程则与充电过程相反。液流电池是一种具有可重复充放电能力的电池类型，电池单元之间由一张离子交换膜相隔，膜的两侧分别

放置有电极^[10]，电极紧挨着双极板。双极板在液流电池中起到连接各单电池的作用，隔离相邻单电池的正极电解液和负极电解液，同时负责收集双极板两侧电极反应所产生的电流。

与其他类型的储能电池比较，液流电池有诸多优点：液流电池输出功率可以通过电堆的大小和数量控制，液流电池的储能容量可以通过电解液的容量和浓度控制；液流电池的电解液主要为水溶液为电解质，电解液不会发生着火的风险；液流电池自放电性能可以控制，在液流电池系统关闭下，储存的电解液不会反应发生放电；液流电池材料来源广泛，容易回收再利用。

2 液流电池中双极板功能

在液流电池中，双极板^[11]的功能主要体现在以下几个方面：首先，它在电流收集与传导方面至关重要，确保电池充放电过程中电流流动的顺畅；其次，双极板为膜及电极等组件提供有效的机械支撑，从而保持电池结构的稳定性和完整性；此外，双极板还起到分隔作用，防止正负极电解液的相互混合及电极的直接接触，为电池的安全运行提供保障；最后，良好的双极板设计显著提升了液流电池的能量效率，进而增强了电池的整体性能。

3 液流电池双极板的材料

可用与液流电池双极板的主要材料有金属、石墨和碳塑复合材料。金属^[12]在液流电池充电和放电过程中的强酸强氧化环境下容易被腐蚀或形成导电性差的钝化膜，贵金属虽然抗腐蚀性能比较好，但是使用成本高昂。通过电镀、化学沉积等一系列方法对不锈钢材质进行表面工艺处理，增强耐腐蚀性能，提高其作为双极板的使用寿命，但成效有限，难以在液流电池长期充电放电的运行环境下稳定工作，因而金属材质不适合用作液流电池双极板材料。张伟杰^[13]通过对石墨烯改性，大大提高了石墨烯涂层与金属双极板的相

容结合性，为以后研究增强金属基双极板导电和耐腐蚀性能的石墨烯涂层提供了方向。

石墨在液流电池运行条件下具有优良的导电性、耐酸性、化学稳定性和电化学稳定性。无孔石墨板^[14]材料致密，能有效阻止电解液渗漏。无孔石墨板一般由碳粉或石墨粉与树脂制成，在制备过程中石墨化温度高于2500摄氏度，为了避免石墨板收缩或弯曲变形，石墨化过程需要按照严格的升温程序进行，加工周期长。

无孔石墨板为脆性材料，其抗冲击强度和韧性较弱，容易在液流电池装配过程中发生断裂，这些特点限制了其在液流电池中的应用。蔡海卫^[15]石墨双极板泄露原因分析与改善，得出石墨双极板泄露污染电极，影响电堆的正常运行结论。徐冬清^[16]等研究了膨胀石墨导电双极板，研究结构表面以PVDF和石墨为基体，添加膨胀石墨含量为50%，所制备的双极板具有较大导电率和弯曲强度。

碳塑复合双极板^[17]材料是由聚合物和导电填料混合后经模压、注塑等方法制造成型的。其机械性能主要由聚合物提供，通过在聚合物中加入碳纤维、碳纳米管、玻璃纤维等材料提升复合材料的机械强度，其导电网络赋予其导电性能。可以用来作为导电填料的材料有鳞片石墨、炭黑、柔性石墨等。孙斌^[18]等研究了热塑性树脂基碳素复合材料双极板，实验结果表面：以热塑性树脂作为石墨的粘结剂，采用模压一次成型制备复合材料双极板，在较低的成型温度和成型压力下采用溶剂溶解法制备的双极板性能要优于直接混合法；较好的生产工艺参数为树脂含量10%–16%，天然石墨和人造石墨比例为1:1，成型温度为130–160℃，成型压力为8–12MPa。碳塑复合双极板工艺简单，成本低廉，可以在工业化批量生产液流电池用双极板。

4 液流电池双极板的测试

液流电池双极板的测试^[19]方法主要包含以下几种：

4.1 外观检查

检查双极板整体是否均一完整，表面是否有明显的磨损、裂纹、变形等现象；

4.2 力学性能测试

在特定的条件下，测试双极板材料弯曲过程中所能承受的最大弯曲应力，测试双极板材料在拉伸过程中断裂前所承受的最大拉伸应力，双极板材料单位面

积上能承受的极限载荷值；

4.3 厚度测试

通过测量一定数量及尺寸的表面光洁，无褶皱和破损的双极板样品厚度，计算平均厚度，厚度标准偏差和厚度离散系数；

4.4 电阻测试

使用电阻率测试仪器测量双极板材料的体电阻率和接触电阻，计算其在液流电池中的电学性能；

4.5 腐蚀电流密度测试

使用恒电位仪和电化学测量池测量双极板在不同腐蚀介质中的电流密度，评估其耐腐蚀性能和腐蚀塑料；

4.6 充放电测试

在不同电流密度条件下测试性能相同的双极板组成的单个液流电池的电压效率和能量效率。

5 液流电池双极板发展趋势

液流电池用于发电侧经核算初始投资成本为1.33元/Wh，每年循环660次，放电效率为75%，残值价值20%，储能系统寿命20年，可以计算出液流电池度电成本为0.211元/kWh。液流电池具有较大的经济效益，生命周期成本低，高效的资金回报率，应用场景广泛市场巨大。液流电池性能的评价指标主要有能量效率^[20]和储能容量，储能容量主要由电解液活性物质决定，而能量效率是电压效率和库伦效率共同决定。液流电池的电压效率和充电放电过程中产生的电池极化有关，液流电池双极板的电阻越大，就会导致电池极化越大，电池电压效率越低，能量效率也越低。开发新型高导电低成本的双极板尤为迫切。随着液流电池技术在各个领域的广泛应用，液流电池双极板和电极流场等多个部件集成到一起。岳孟^[21]等研究了液流电池流场结构设计与优化，改善了电池内部电解液流动性能，提高电堆功率密度的重要途径，在石墨双极板上刻蚀多种流道结构。上海治臻，国鸿氢能等国内企业已实现双极板规模化生产，国外巴拉德等企业在双极板生产领域占有较大市场份额，这些企业不断技术突破，产能增加，推动了行业的发展^[22]。

6 液流电池经济效益分析

液流电池投资成本由不同的储能类型和储能时间长短决定。全钒液流电池的初始储能投资成本在2.5元–7.5元/Wh，储能工作运行时间越长，单瓦时的投资成本越低，在8小时的储能成本可以到达2元/Wh，和锂电池储能成本相当。随着技术不断发展和电

池的规模化生产，液流电池的成本将会进一步降低^[23]。根据专家学者预测，全钒液流电池的初始单千瓦可以减少到2000元，每度电的成本也好降低到0.42元/W。在风力发电应用场景使用的全钒液流电池储能系统，能够实现跟踪计划规划出力发电，减少弃风，提升并网质量，从而表现出较好的资金回报率。液流电池的投资回收期由多重因素决定，主要有储能功率，储能容量，储能应用场景，电价成本等因素，在储能功率和储能容量合理分配下，投资回收期会大大缩短。液流电池储能在储能行业经济效益表现出众，虽然初始投资成本高，但其有寿命长，全周期本质安全，高资金回报率和广阔的市场应用前景等优势。预计未来数十年，液流电池市场规模逐渐扩大，有着良好的经济效益^[24]。

7 结论

随着液流电池技术的改革创新，液流电池对双极板的性能要求会越来越高。未来双极板材料将会朝着低成本、高性能、易于加工成型的方向发展。同时，新型具有流道结构双极板的设计和电极双极板一体化的开发工作也将不断推进，以进一步提高液流电池性能，双极板性能提升将为液流电池的商业化应用奠定坚实基础。

参考文献：

- [1] 田军,朱永强,陈彩虹.储能技术在分布式发电中的应用[J].电气技术,2010(8):6.
- [2] 陈海生,刘金超,郭欢,等.压缩空气储能技术原理[J].储能科学与技术,2013(2):6.
- [3] 陆俊杰,陈光会,王巨丰,等.不同风速概率分布参数下的风力抽水储能分析[J].华东电力,2009,37(6):4.
- [4] 刘景.锂离子电池正极材料的研究进展[J].无机材料学报,2002,1(17):1-9.
- [5] 刘素琴,黄可龙,刘又年,等.储能钒液流电池研发热点及前景[J].电池,2005.
- [6] 王峰,廉嘉丽,王康丽,等.新型炭材料在超级电容器与铅炭电池中的应用研究进展[J].储能科学与技术,2014(6):9.
- [7] 李伟峰,马素花,沈晓冬.钠电池用Na/ β -Al₂O₃固体电解质制备技术研究进展[J].功能材料,2014,45(5):6.
- [8] 张华民,王晓丽.全钒液流电池技术最新研究进展[J].储能科学与技术,2013,(003):281-288.
- [9] 王文嫔,王金海,王树博,等.全钒氧化还原液流电

池复合双极板制备与性能[J].化工学报,2011(S1):5.

- [10] 李文跃,魏冠杰,刘建国,等.全钒液流电池电极材料及其研究进展[J].储能科学与技术,2013(4):7.
- [11] 戴纹硕,郭睿远,陈向南,等.全钒液流电池双极板材料研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(4):1310-1325.
- [12] 程立明,魏广科,王习鹏.一种具有对流式冷却液流场的金属双极板[S],2015.
- [13] 张伟杰,李静.增强金属基双极板导电和耐腐蚀性能的石墨烯基涂层的研究进展[J].有色金属材料与工程,2023,44(4):61-67.
- [14] 吴沣,李聃华,梁冉,等.液流电池及燃料电池中石墨双极板的制作方法,2024,(08):23.
- [15] 蔡海卫,周炳海.石墨双极板泄漏原因分析及改善[J].精密制造与自动化,2022(002):000.
- [16] 徐冬清,范永生,刘平,等.全钒液流电池导电双极板材料研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2009,000:117-118.
- [17] 刘宗浩,张华民,韩希,等.一种液流储能电池用碳塑导电复合双极板及其制备[P].CN200710011335.3,2024.
- [18] 孙斌,邹彦文,张杰,等.热塑性树脂基碳素复合材料双极板的研究[J].电源技术,2006,30(7):3.
- [19] NB/T 42007-2013,全钒液流电池用双极板.测试方法[S].2013.
- [20] 马军,李爱魁,董波,等.提高全钒液流电池能量效率的研究进展[J].电源技术,2013,37(8):4.
- [21] 岳孟,郑琼,阎景旺,等.液流电池流场结构设计与优化研究进展[J].化工进展,2021.
- [22] 张华民.全钒液流电池技术及应用[C]//2016中国国际新能源材料及动力电池高峰论坛暨第八届中国储能与动力电池及其关键材料学术研讨与技术交流会,2016.
- [23] 陈晖,刘建国,严川伟.关于钒电池中支路电流(shunt current)的计算[C]//第二届中国储能与动力电池及其关键材料学术研讨会与技术交流会,2007.
- [24] 宋文君.锌溴液流电池各部件及电堆的制备研究[D].辽宁:大连理工大学,2013.

作者简介：

文明哲(1997-),男,汉族,河南长垣市人,材料工程师,硕士,就职于开封时代新能源科技有限公司,研究方向:全钒液流电池。