

钒电池电堆和电解液适配性研究

许刚 贾强方

(四川化工集团有限责任公司成都工程分公司, 四川成都, 610100)

摘要: 钒电池作为一种清洁、高效的储能装置, 发展潜力巨大, 其中电堆、电解液是钒电池最重要的组成部分, 直接关系到钒电池直流侧能量转化效率。但是目前市场上的钒电池电堆、电解液种类多、差异化大, 造成部分钒电池储能项目能量转化效率性能不理想。通过对市场上成熟的电堆、电解液产品进行适配性测试, 在额定恒功率模式、80% 额定恒功率模式、140 mA/cm² 电流密度恒电流模式、170 mA/cm² 电流密度恒电流模式四种充放电测试模式下进行分析, 匹配出最佳的钒电池电堆、电解液组合, 为电池电堆与电解液适配性研究提供参考。

关键词: 钒电池; 钒电解液; 能量效率; 恒功率; 恒电流; 适配性

0 引言

全钒液流电池, 全称为全钒氧化还原液流电池 (Vanadium Redox Battery, VRB), 是以 +4、+5 价态的钒离子溶液作为正极的活性物质, 以 +2、+3 价态的钒离子溶液作为负极的活性物质, 分别储存在各自的电解液储罐中。全钒液流电池中的钒理论上不会被消耗或消散, 可进行循环使用, 不会造成资源短缺浪费, 具有良好的保值属性, 并且具有安全性高、循环寿命极长、环境友好、响应速度快、容量规模易调节等优点。在政策支持和市场需求的推动下, 钒电池的关键单元电堆和电解液性能不断提高, 成本不断下降。目前市场上的钒电池电堆、电解液种类多、差异化大, 造成部分钒电池储能项目能量转化效率性能不理想, 为了钒电池集成系统效率提升, 本研究通过对市场上成熟的电堆、电解液产品在测试平台上进行适配性测试, 形成最佳的钒电池电堆、电解液组合, 为电池电堆与电解液适配性研究提供参考。

1 测试主要设备和材料

1.1 测试平台

本研究测试平台为全钒液流电池的缩小版, 以方便进行钒电池系统各种型号电堆、电解液的综合

性能测试, 通过测试数据对电堆和电解液的适配性进行综合评估, 为电堆、电解液的研究和生产提供科学依据, 为全钒液流电池系统的优化提供解决方案。

测试平台由电池管理系统 (BMS)、逆变器控制系统 (PCS)、上位机监控及数据管理系统、正负极电解液罐、测试电堆及电解液组成, 单堆测试功率最大为 150 kW。其中 PCS 包括能量双向的交流模块 (AC) 和直流模块 (DC), 为测试平台提供稳定的电流电压, 可分别开展恒功率、恒电流、恒电压三种充放电测试模式, 实现了 PCS 对测试功率控制及测试数据的检测功能。另外, 在上位机 (电脑) 与设备通讯中断时, 设备能持续存储测试数据, 通讯恢复后将数据上传至上位机, 上位机管理系统主要负责根据测试需求设置测试参数, 同时满足实时数据显示以及测试数据记录和数据分析的功能。

1.2 测试电堆

本研究所用测试电堆来源于市场上较为成熟的钒电池电堆生产厂家产品, 电堆分别为: T 公司 25.6 kW 和 42 kW 电堆、W 公司 32 kW 电堆、F 公司 32 kW 电堆、L 公司 32 kW 电堆, 电堆参数如表 1 所示。

通讯作者: 许刚, 本科、高级工程师, 主要从事钒电池储能技术研究, 邮箱: 810974271@qq.com

表 1 各公司电堆参数表

电堆编号	生产厂家	功率/kW	长/mm	宽/mm	高/mm	体积/m ³	重量/kg	单堆片数/片
T1	T 公司	42.0	840	550	800	0.369 6	550	96
T2	T 公司	25.6	819	360	840	0.247 7	300	40
W	W 公司	32.0	970	670	600	0.389 9	450	64
F	F 公司	32.0	1 453	800	512	0.595 1	670	74
L	L 公司	32.0	880	1 060	600	0.559 7	600	88

1.3 钒电解液

本研究所用测试钒电解液主要采用市场上较为成熟的 4 家钒电解液产品，各公司电解液参数如表 2 所示。

表 2 4 家公司钒电解液参数表

钒电解液编号	生产厂家	钒总浓度 /mol·L ⁻¹	价态	SO ₄ ²⁻ 浓度 /mol·L ⁻¹	Fe 含量 /mg·L ⁻¹
A	A 公司	1.74	3.5	4.67	23
B1	B 公司传统流程	1.69	3.5	4.52	59
B2	B 公司短流程	1.74	3.5	4.44	43
C	C 公司	1.71	3.5	4.41	14
D	D 公司	1.67	3.5	4.01	16

2 测试方案

在测试平台中安装钒电池电堆产品，依次灌注 1 m³ 钒电解液测试产品，测试条件为恒功率模式下额定功率、80% 额定功率，恒电流模式下 140、170 mA/cm² 电流密度，测试方法参考《全钒液流电池电堆测试方法》（NB/T 42132—2017），对比分析电堆、电解液适配性。

3 测试结果及分析

3.1 A 钒电解液适配性测试结果及分析

采用 A 钒电解液与 T1、T2、W、F、L 五种电堆在恒功率和恒电流模式下进行测试。

3.1.1 恒功率模式下测试结果

在恒功率模式下进行充放电测试结果如表 3 所示。

表 3 A 钒电解液在恒功率模式下测试结果 %

电堆编号	额定功率下能量效率	80% 额定功率下能量效率
T1	81.60	82.90
T2	82.47	83.31
W	82.21	83.17
F	81.40	82.27
L	77.10	79.36

额定功率下进行充放电测试时，T1、T2、F 以及 W 电堆能量效率均达到 80% 以上，特别是 T2、W 电堆能量效率达到 82% 以上；L 电堆测试能量效率在 77% 左右，效果不佳。

80% 额定功率下进行充放电测试时，T1、T2、F 以及 W 电堆能量效率均达到 82% 以上，特别是 T2 电堆、W 电堆达到 83% 以上；L 电堆测试能量效率有所提升，达到 79.36%。

3.1.2 恒电流模式下测试结果

在恒电流模式下进行充放电测试结果如表 4 所示（F 电堆由于厂家对电堆技术参数保密，无法开展恒电流密度测试；L 电堆无法正常进行充放电测试，无检测数据）。

表 4 A 钒电解液在恒电流模式下测试结果 %

电堆编号	140 mA/cm ² 电流密度下能量效率	170 mA/cm ² 电流密度下能量效率
T1	82.79	81.38
T2	83.56	81.78
W	82.10	78.19
F		
L	77.90	-

电流密度为 140 mA/cm² 时，T1、T2、W 电堆能量效率均达到 82% 以上，T2 电堆达到 83.56%；L 电堆测试能量效率达到 77.90%，相对较低。

电流密度为 170 mA/cm² 时，T1、T2 电堆能量效率均达到 81% 以上，性能良好；W 电堆能量效率仅 78.19%。

3.1.3 A 钒电解液适配性测试结果分析

在额定功率、80% 额定功率、140 mA/cm² 电流密度、170 mA/cm² 电流密度 4 种测试条件下对 A 钒电解液与 5 种钒电池电堆进行适配性测试，测试结果表明：性能最佳为 T2 电堆，其次分别为 T1、W、F 电堆，L 电堆测试能量效率低于 80%，性能一般。

3.2 B1、B2 钒电解液适配性测试结果及分析

采用 B1、B2 钒电解液与 T1、T2、F、L 四个电堆在恒功率和恒电流模式下进行适配性测试（由于 W 电堆出现故障，故后续没有继续对其测试）。

3.2.1 恒功率模式下性能测试测试结果

在恒功率模式下进行充放电测试结果如表 5 所示（T2 电堆与 B1 在恒功率模式下无法正常进行充放电测试，无检测数据）。

表 5 B1、B2 钒电解液在恒功率模式下测试结果 %

电堆编号	额定功率下能量效率		80% 额定功率下能量效率	
	B1	B2	B1	B2
T1	80.33	80.58	82.57	82.47
T2	-	80.02	-	81.87
F	79.33	78.34	81.74	81.33
L	76.73	75.75	79.41	78.23

额定功率下进行充放电测试时，T1、T2 电堆能量效率达到 80% 以上；F 电堆能量效率在 79% 左右；L 电堆测试能量效率均在 76% 左右，效果不佳。两种电解液测试对比，B1 性能微优于 B2。

80% 额定功率下进行充放电测试时，T1、T2、F 电堆能量效率均达到 81% 以上，特别是 T1 电堆能量效率达到 82% 以上。两种电解液对比，相同电堆条件下 B1 性能优于 B2。

3.2.2 恒电流模式下性能测试结果

在恒电流模式下进行充放电测试结果如表 6 所示（F 电堆由于厂家对电堆技术参数保密，无法开展恒电流密度测试；T2 电堆与 B1 在恒电流模式下无法正常进行充放电测试，无检测数据）。

表 6 B1、B2 公司钒电解液在恒电流模式下测试结果 %

电堆编号	140 mA/cm ² 电流密度下 能量效率		170 mA/cm ² 电流密度下 能量效率	
	B1	B2	B1	B2
T1	81.83	80.12	81.82	79.74
T2	-	81.43	-	78.97
F				
L	79.21	76.78	77.25	75.27

140 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，T1、T2 电堆能量效率均达到 81% 以上；L 电堆与 B1、B2 电解液测试能量效率分别为 79.21%、77.25%，能量效率较低，两种电解液对比差距较大。

170 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，T1 电堆能量效率均达到 80% 以上；T2、L 电堆能量效率低于 80%。两种钒电解液对比，传统流程钒电解液产品性能优于短流程钒电解液产品，L 电堆与传统流程、短流程电解液测试能量效率分别为 76.78%、75.27%，能量效率较低。

3.2.3 B1、B2 钒电解液适配性测试结果分析

在额定功率、80% 额定功率、140 mA/cm² 电流密度、170 mA/cm² 电流密度 4 种测试条件下对 B1、B2 钒电解液与 4 个钒电池电堆进行适配性测试，测试结果表明：同等条件下，B1、B2 钒电解液与 4 个电堆测试结果均低于 A 钒电解液测试结果，能量效率降低 1% ~ 1.5%。性能最佳为 T1、T2 电堆，测试数据相近。

3.3 C 钒电解液适配性测试结果及分析

采用 C 钒电解液与 T1、T2、F、L 四个电堆在恒功率和恒电流模式下进行适配性测试。

3.3.1 恒功率条件下性能测试测试结果

在恒功率模式下进行充放电测试结果如表 7 所示。

表 7 C 钒电解液在恒功率条件下测试结果 %

电堆编号	额定功率下能量效率	80% 额定功率下能量效率
T1	78.92	81.07
T2	78.88	80.59
F	78.90	81.08
L	77.13	79.33

额定功率下进行充放电测试，使用 C 钒电解液条件下，4 种电堆能量效率均低于 80%。其中，T1、T2、F 电堆能量效率在 79% 左右；L 电堆测试能量效率在 77% 左右，效果不佳；以往测试中 T1、T2 电堆能量效率大于 F 电堆，在本次测试中能量效率接近；T1、T2 两种电堆能量效率均出现了下降，说明 C 电解液与 T 公司电堆适配性较差。

80% 额定功率下进行充放电测试，使用 C 钒电解液条件下，T1、T2、F 电堆能量效率均高于 80%，其中，T1 电堆、F 电堆能量效率在 81% 以上；L 电堆测试能量效率在 79% 左右，效果不佳。此外，各电堆测试能量效率低于 A、B 电解液 1% ~ 2%。

3.3.2 恒电流模式下性能测试结果

在恒电流模式下进行充放电测试结果的结果如表 8 所示（F 电堆厂家由于电堆技术参数保密，无法开展恒电流密度测试）。

表 8 C 钒电解液在 170 mA/cm² 电流密度下测试结果 %

电堆编号	140 mA/cm ² 电流密度下 能量效率	170 mA/cm ² 电流密度下 能量效率
T1	80.57	78.31
T2	79.72	77.96
F		
L	78.85	76.37

140 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，T1 电堆能量效率均达到 80% 以上，其余电堆均低于 80%；T1、T2 电堆测试结果相较其他电解液较差；L 电堆测试能量效率为 78.85%，能量效率较低，但与其他电解液测试结果比较差异不大。

170 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，三种电堆能量效率低于 80%，其中 T1、T2 能量效率在 78% 左右；L 电堆能量效率保持在 76.37%，与其他电解液测试结果差异不大。

3.3.5 C 钒电解液适配性测试结果分析

在额定功率、80% 额定功率、140 mA/cm² 电流密度、170 mA/cm² 电流密度 4 种测试条件下对 4 个钒电池电堆与 C 钒电解液进行适配性测试，测试结果表明：同等条件下，使用 C 电解液与 4 个电堆测试结果均低于使用 A 钒电解液测试结果，能量效率低 2%~3%。T1、T2 电堆测试结果降低 2%~3%。F、L 电堆测试结果与其他电解液测试结果差异不大。

3.4 D 钒电解液适配性测试结果及分析

采用 D 钒电解液与 T1、T2、L 电堆在恒功率和恒电流模式下进行适配性测试（由于 F 电堆出现故障，故没有继续对其测试）。

3.4.1 恒功率条件下性能测试结果

在恒功率模式下进行充放电测试结果如表 9 所示。

表 9 D 钒电解液在恒功率条件下测试结果 %

电堆编号	额定功率下能量效率	80% 额定功率下能量效率
T1	78.12	80.57
T2	80.57	81.73
L	75.10	77.80

额定功率下进行充放电测试，使用 D 钒电解液条件下，T2 电堆能量效率最高，达到 80.57%；T1、L 电堆测试能量效率均低于 80%，效果不佳。

80% 额定功率下进行充放电测试，使用 D 钒电解液条件下，T1、T2 电堆能量效率在 80% 以上；L 电堆测试能量效率在 77.80% 左右，效果不佳。各电堆测试能量效率低于其他电解液 1%~2%。

3.4.2 恒电流模式下性能测试结果

在恒电流模式下进行充放电测试结果如表 10 所示。

表 10 D 钒电解液在恒电流模式下测试结果 %

电堆编号	140 mA/cm ² 电流密度下 能量效率	170 mA/cm ² 电流密度下 能量效率
T1	80.01	77.71
T2	80.88	79.13
L	77.45	74.85

140 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，T1、T2 电堆能量效率均达到 80% 以上，测试效果优于 C 电解液测试结果；L 电堆测试能量效率为 77.45%，能量效率较低。

170 mA/cm² 电流密度下进行充放电测试，三种电堆能量效率低于 80%，其中 T1、T2 电堆能量效率在 78% 左右；L 电堆能量效率保持在 74.85%，能量效率较低。

3.4.3 D 钒电解液适配性测试结果分析

在额定功率、80% 额定功率、140 mA/cm² 电流密度、170 mA/cm² 电流密度 4 种测试条件下对 3 个钒电池电堆与 D 钒电解液进行适配性测试，测试结果表明：同等条件下，使用 D 电解液与 3 个电堆测试结果均低于使用 A 钒电解液测试结果，能量效率低 2%~3%。T2 电堆各条件下测试结果高于 T1 电堆测试结果，但均低于 A、B 电解液测试结果。

4 额定功率下电堆、电解液适配性对比

钒电池电堆通常在额定功率条件下使用，综合以上数据，对各厂家钒电池电堆在额定功率下与各电解液产品进行对比，结果如图 1 所示。

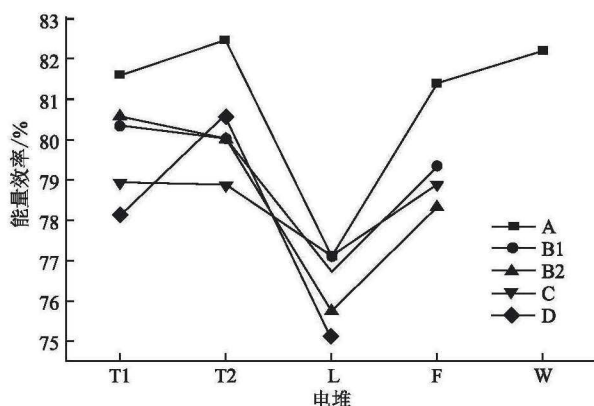


图1 各电堆、电解液额定功率测试结果

可以看出, T1、T2 电堆与 A、B1、B2 电解液适配性良好, 能量效率达到 80% 以上; W 电堆只与 A 电解液进行了测试, 能量效率接近 T1 电堆, 性能相对较好; F 电堆与 A 电解液适配性良好, 达到 81%, 与其他电解液匹配能量效率低于 80%; L

电堆与五种电解液匹配测试能量效率仅有 75% ~ 77%, 表现不佳。综上, 测试结果较好的电堆为 T1、T2、W 电堆; 测试结果较好的电解液为 A、B 钒电解液。

5 结语

通过对市场上成熟钒电池电堆产品、电解液适配性研究, 深入了解各家钒电池电堆、电解液产品的优势与劣势, 为钒液流储能电池项目建设提供可靠的数据支撑, 为进一步提升行业发展提供动力。此外, 钒电池系统充放电控制模式、余热回收及利用、储罐定制化设计、旁路电流降低措施等方面均对钒液流储能电池能量转化效率有重要影响, 如何进一步优化设计, 提升钒电池整体能量转化效率, 需钒电池储能行业人员共同努力。

Research on the Adaptability of Vanadium Battery Stack and Electrolyte

XU Gang, JIA Qiangfang

(Sichuan Chemical Industry Group Co., Ltd., Chengdu Engineering Branch, Chengdu 610100, Sichuan, China)

Abstract: Vanadium batteries, as a clean and efficient energy storage device, have great potential for development. Among them, the stack and electrolyte are the most important components of vanadium batteries, which directly affect the energy conversion efficiency of the DC side of vanadium batteries. However, the wide variety and differentiation of vanadium battery stacks and electrolytes in the current market have resulted in unsatisfactory energy conversion efficiency performance for some vanadium battery energy storage projects. By conducting compatibility tests on mature stack and electrolyte products in the market, analysis was conducted in four charging and discharging test modes: rated constant power mode, 80% rated constant power mode, 140 mA/cm² current density constant current mode, and 170 mA/cm² current density constant current mode. The optimal combination of vanadium battery stack and electrolyte was matched to provide reference for the research on the compatibility of battery stack and electrolyte.

Key words: vanadium battery; vanadium electrolyte; energy efficiency; constant power; constant current; adaptability