

# 行业标准

锂离子电池正极材料电化学性能测试

交流阻抗法测试方法

编  
制  
说  
明

(审查稿)

广东邦普循环科技有限公司

2026年3月

# 行业标准《锂离子电池正极材料电化学性能测试交流阻抗法 测试方法》编制说明

## 一、工作简况

### 1.1 任务来源

根据工业和信息化部办公厅关于下达 2024 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划（工信厅科函〔2024〕191 号）的文件，行业标准《锂离子电池正极材料电化学性能测试交流阻抗法测试方法》由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC243）提出并归口，由广东邦普循环科技有限公司牵头起草。该项目计划编号为 2024-0833T-YS，项目计划完成年限为 2026 年。

### 1.2 主要参加单位和工作成员及其所做的工作

#### 1.2.1 起草单位简介

广东邦普循环科技有限公司创立于 2005 年，位于广东佛山三水工业园区（国家高新技术开发区），总注册资本 13274.06892 万元人民币。邦普循环具有七大生产基地，专业从事数码电池（手机和笔记本电脑等数码电子产品用充电电池）和动力电池（电动汽车用动力电池）回收处理、梯度储能利用；传统报废汽车回收拆解、关键零部件再制造；以及高端电池材料和汽车功能瓶颈材料的工业生产、商业化循环服务解决方案的提供。广东邦普循环拥有国家企业技术中心、新能源汽车动力电池循环利用国家地方联合工程研究中心、电化学储能技术国家工程研究中心邦普分中心、中国合格评定国家认可委员会（CNAS）认证的测试验证中心、广东省电池循环利用企业重点实验室等科研平台。

#### 1.2.2 主要参编单位情况

标准主编单位广东邦普循环科技有限公司在标准预研过程中，积极主动收集国内外锂离子电池正极材料的检测方法，对比分析，结合检测中心的测试方法，确定了锂离子电池正极材料电化学检测方法—交流阻抗测试方法，并予以立项申报。标准立项后，积极召集行业内相关单位参与标准的制定工作。标准编制过程中，从公司技术中心及其他供样单位收集样品，从检测中心召集经验丰富的电化学工程测试师、取制样技术员，对本标准进行充分的试验论证，并编制标准文本、试验报告及标准编制说明。

标准编制组单位有广东邦普循环科技有限公司、济宁无界科技有限公司、深圳市德方纳米科技股份有限公司、天津国安盟固利新材料股份有限公司、巴斯夫杉杉电池材料有限公司、西北有色金属研究院、格林美（无锡）能源材料有限公司、合肥国轩高科动力能源有限公司、湖北万润新能源科技股份有限公司、湖南长远理科新能源有限公司、浙江友山新材料有限公

司、国联汽车动力电池研究院有限责任公司等。

一验单位为广东邦普循环科技有限公司、济宁无界科技有限公司、天津国安盟固利新材料股份有限公司、深圳市德方纳米科技股份有限公司、巴斯夫杉杉电池材料有限公司，负责对试验过程参数进行验证。西北有色金属研究院、格林美（无锡）能源材料有限公司、合肥国轩高科动力能源有限公司、湖南长远锂科新能源有限公司、浙江友山新材料有限公司、国联汽车动力电池研究院有限责任公司、湖北万润新能源科技股份有限公司等负责对试验报告中的数据填写。

其中，提供样品的单位为广东邦普循环科技有限公司、济宁无界科技有限公司、深圳市德方纳米科技股份有限公司、天津国安盟固利新材料科技股份有限公司。由广东邦普循环科技有限公司制备磷酸铁锂和钴酸锂扣式半电池，济宁无界科技有限公司制备锰酸锂和镍钴锰酸锂扣式半电池。

### 1.2.3 主要工作成员所负责的工作情况

本标准主要起草人及其工作职责见表 1。

表 1 主要起草人及工作职责

起草人	工作职责

## 1.3 主要工作过程

### 1.3.1 立项阶段

2024 年 6 月 3 日，工业和信息化部办公厅关于印发 2024 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划的通知国家（工信厅科函〔2024〕191 号）的文件，行业标准《锂离子电池正极材料电化学性能测试交流阻抗法测试方法》立项成功。

### 1.3.2 起草阶段

2024 年 9 月，全国有色金属标准化技术委员会在内蒙古呼和浩特组织召开了有色标准工作会议，来自广东邦普循环科技有限公司、深圳市德方纳米科技股份有限公司、湖北万润新能源科技股份有限公司、湖南长远锂科新能源有限公司、浙江华友钴业股份有限公司、格林美（无锡）能源材料有限公司、巴斯夫杉杉电池材料有限公司、天津国安盟固利新材料科技股份有限公司、济宁无界科技有限公司、国标（北京）检验认证有限公司等单位参加了会议，会议对《锂离子电池正极材料电化学性能测试交流阻抗法测试方法》进行了任务落实。

2025 年 3 月，广东邦普循环科技有限公司接收任务后，成立了标准编制工作组，主要由锂离子电池正极材料电化学检测工作人员组成，根据产品的性质及试验结果，形成了内部标准讨论稿 V1。2024 年 6 月，标准编制组向各参编单位发送标准调研表，对标准中涉及的

参数和关键测试方法开展了调研，于 2025 年 8 月形成了标准讨论稿 V2。标准讨论稿、试验报告连同统一样品和制作的扣式半电池寄送给验证单位，开展验证试验。

### 1.3.3 征求意见阶段

2025 年 9 月 25 日，全国有色金属标准化技术委员会于西安召开有色金属标准工作会议。来自广东邦普循环科技有限公司、北京当升材料科技股份有限公司、贵州振华新材料股份有限公司等 40 余家单位代表参加了会议，对本文件的征求意见稿进行了认真细致的讨论，提出了修改意见和建议。同时，全国有色金属标准化技术委员会通过工作群、邮件向委员单位征求意见，并将征求意见资料在 [www.cnsmq.com](http://www.cnsmq.com) 网站上挂网，向社会公开征求意见。征求意见的单位包括主要生产、经销、使用、科研、检验等单位及大专院校，征求意见单位广泛且具有代表性，征求意见时间大于 1 个月。

### 1.3.4 审查阶段

.....

### 1.3.5 报批阶段

.....

## 二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

### 2.1 标准编制原则

1.本文件按 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》、GB/T20001.4-2015《标准编写规则第 4 部分：试验方法标准》要求编写。

2.本文件的试验方法是根据锂离子电池正极材料的检测现状和要求，既能满足检测材料电学性能测试的要求，又能简洁易行，降低成本，可操作性强。

### 2.2 测试方法的确定

交流阻抗测试是研究锂电池关键特性与动态过程的重要表征方法。其基本原理是向电化学系统施加一个幅值较小（通常几毫伏以内）的交流正弦电势（或电流）扰动信号，该信号的频率在设定范围（如 100kHz 至 10mHz）内扫描变化，同时同步测量系统产生的电流（或电势）响应信号。由于锂电池中存在双电层充放电、电荷转移、锂离子扩散等多种弛豫过程，其响应信号与扰动信号之间存在幅度比和相位差（ $\phi$ ），可以得到交流阻抗谱图。

通过分析交流阻抗谱的 Bode 图或 Nyquist 图特征，可建立与锂电池内部物理化学过程相对应的等效电路模型（通常包含欧姆电阻、电荷转移电阻、双层电容等）。通过拟合电路参数，可定量解析电池的欧姆内阻、电极界面反应动力学、固态电解质界面膜特性、锂离子

扩散行为以及容抗弛豫过程，从而用于评估电池的健康状态（SOH）、荷电状态（SOC）、老化机制，并辅助进行正负极材料、电解液配方以及界面改性效果的优化研究。

该方法因采用小幅度交流微扰，对电池体系近似无损，且能区分不同时间尺度的内部过程，已成为锂电池研发、状态监测和失效分析中的关键实验技术。扣式半电池采用金属锂片作对电极，对正极材料的电化学性能测试干扰较小，因此本标准使用扣式半电池法评价锂离子电池正极材料的电化学性能。

## 2.3 标准主要内容说明

本文件正文部分共分为 11 章，其中第 1、2、3、4 章为规范性一般要素，包括范围、规范性引用文件、术语和定义、原理；第 5~9 章为规范性技术要素，规定了电池低温性能测试方法等。

第 1 章范围：本文件描述了锂离子电池正极材料的交流阻抗测试方法。本文件适用于锂离子电池用钴酸锂、镍钴锰酸锂、磷酸铁锂等正极材料的交流阻抗电化学性能测试

第 2、3、4 章分别为规范性引用文件、术语和定义、符号。按照最新修订的 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求，撰写了相关章节。

第 5 章试验条件进行了规定。为保证测试结果的准确性与重复性，除特殊步骤按相应标准执行外，实验应在  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $\leq 60\%$  的受控环境中进行，以最大限度减少温湿度波动对电池关键动力学参数的影响。进行交流阻抗测试时，推荐使用屏蔽箱隔绝外界电磁干扰，确保采集到的微弱电化学信号不失真，从而保障阻抗数据的真实性与可靠性。

第 6 章试剂或材料规定了需要用到的各种原料或试剂清单，对于可商品化采购的标准件，不再阐述各个部件的具体细节及参数。

第 7 章规定交流阻抗测试小节需要用到的各种仪器设备清单，本章中只规定和列出了潜在影响实际试验效果的关键必备设备及其具体参数的要求，对于试验台、口罩、手套等与试验开展相关且必需的共性要求，不在本章列出。

第 8 章规定了交流阻抗测试的步骤，包括测定前准备、电池状态的检测和交流阻抗测试的要求，是本文件中核心章节，本章节按照时间序和操作流程的方式进行编排，重点关注试验步骤的科学性、规范性、可操作性。

第 9 章是实验数据处理，给出了交流阻抗的数据处理过程。

第 10 章给出了锂离子电池正极材料测试允许差的参考范围。

第 11 章试验报告，规定了报告所包含的必备要求内容，包括样品名称及批次、试验结果、试验日期、本文件没有规定的或认为可以自定的各种操作、可能影响试验结果的情况，及本文件编号。

### 2.2.3 标准主要条件说明

#### 2.2.3.1 交流阻抗谱图和等效电路

锂离子电池的典型 Nyquist 图（奈奎斯特图，以虚阻抗对实阻抗作图）通常由三个主要部分构成，这些部分对应于电池内部从高频到低频的不同物理化学过程：

1) 高频区（与实轴的交点）：

特征：谱图与实轴相交的第一个截距，为欧姆电阻（ $R_{\Omega}$ ）。这主要反映电解液的离子电导率、隔膜的孔隙率以及电极材料的本征电阻和接触电阻。它不随频率变化，是电池最基本的阻抗信息。

2) 中高频区：

特征：一个或多个半圆。描述了第一个半圆通常归因于锂离子通过电极表面固体电解质界面膜的迁移过程。它对应着固体电解质界面膜（ $R_{sf}$ ）和其电容。如果固体电解质界面膜非常稳定或很薄，这个弧可能不明显，甚至与中频区重叠。

3) 中频区：

特征：位于中频段的另一个半圆。描述了电荷转移过程。它反映了锂离子在双电层中发生电化学反应并嵌入电极材料晶格的过程。这个弧的大小直接决定了电荷转移电阻（ $R_{ct}$ ），是衡量反应动力学难易程度的关键指标。与之并联的是双电层电容（ $C_{dl}$ ）。

4) 低频区（斜线）：

特征：一条与实轴呈近似  $45^{\circ}$  角的斜线。描述了固相扩散过程。它描述了锂离子在电极活性材料颗粒内部的浓度梯度驱动下的扩散行为，这部分对应 Warburg 阻抗。

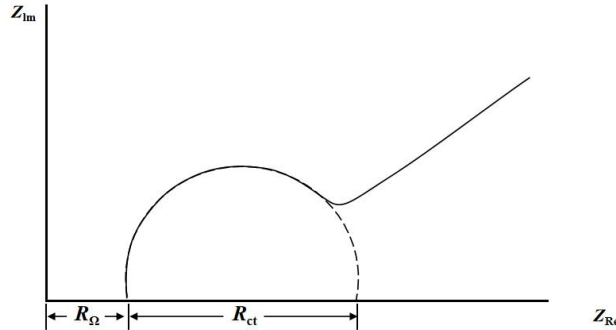


图 1 无固体电解质界面膜（或固体电解质界面膜较薄）的奈奎斯特图

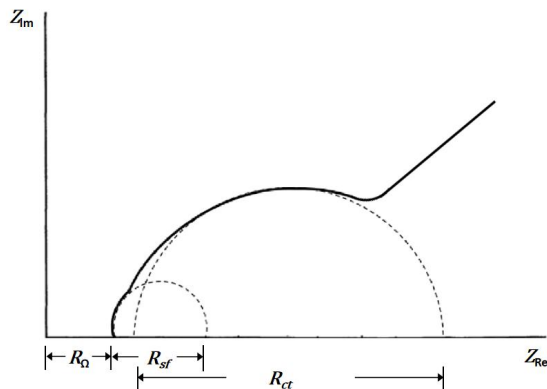


图 2 有固体电解质界面膜的奈奎斯特图

在等效电路中，理想电容的行为是单一的，只有容量值  $C$ ，但在锂电池化学体系中，由于电极表面粗糙、多孔、吸附现象或电流分布不均匀，实际测得的“电容”行为并不是完美的半圆，而是呈现为一个压扁的半圆。此时，用纯电容无法精确拟合实验数据，因此引入了经常相位角元件 CPE。电化学阻抗谱和等效电路之间并不存在一一对应的关系。同一个阻抗谱可用多个等效电路进行很好的拟合，等效电路模型不是唯一的。在实际拟合过程中，要考虑该等效电路的每一个元件在具体的被测体系中是否有明确的物理意义，能否合理解释物理过程，才能最终确定模型的有效性。

典型的锂离子电池等效电路模型按是否有固体电解质界面阻抗分为 (a) 无固体电解质界面阻抗和 (b) 有固体电解质界面阻抗，示意图如图 3 所示。当奈奎斯特图为 1 时选择 (a) 模型，当奈奎斯特图为 2 时选择 (b) 模型。

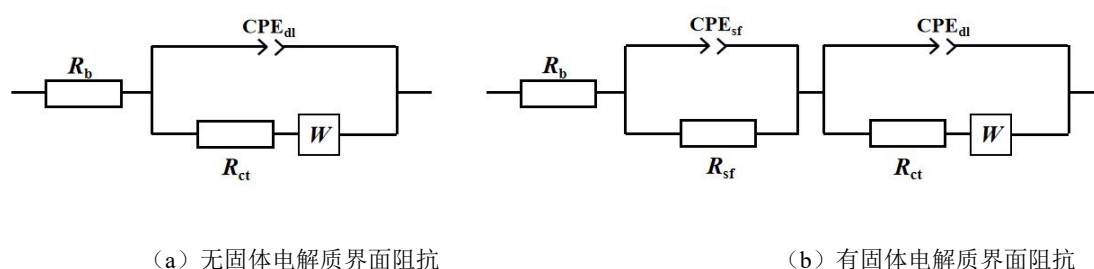


图 3 典型的锂离子电池等效电路模型

- $R_o$  ——欧姆电阻；
- $R_{sf}$  ——固体电解质界面膜的电阻；
- $CPE_{sf}$  ——固体电解质界面膜的电容；
- $R_{ct}$  ——电荷转移电阻；
- $CPE_{dl}$  ——双电层电容；
- $W$  ——Warburg阻抗，即锂离子扩散阻抗。

### 2.2.3.2 测试振幅

本文件对振幅的大小进行试验。取钴酸锂样品进行试验，按同一配方质量分数制备扣式半电池，静置 12h 后（无需活化），分别按振幅为 2mV、5mV、10mV、15mV、30mV 进行测试，每个振幅下测试 2 次取平均值，结果见下表 2。随着振幅的增大，从 5mV 以后，拟合计算得到的数值越稳定。因此，为了确保系统的稳定性，本文件规定的测试振幅为 5mV~10mV。

表 2 振幅条件试验

实验室	振幅	2mV	5mV	10mV	15mV	30mV
实验室 1	$R_o$	2.292	2.403	2.411	2.415	2.408
	$R_{ct}$	208.39	244.7	245.92	246.12	246.4
实验室 2	$R_o$	1.721	1.562	1.550	1.556	1.555
	$R_{ct}$	145.89	162.23	165.02	164.81	163.99
实验室 3	$R_o$	2.859	2.879	2.886	2.884	2.882
	$R_{ct}$	253.1	262.1	283.3	285.1	284.8
实验室 4	$R_o$	0.78	0.75	0.74	0.66	0.92
	$R_{ct}$	23.51	29.64	27.52	31.44	37.75

### 三、试验验证分析、预期达到的社会效益

#### 3.1 试验验证分析

##### 3.1.1 试验的选择与影响

本文件分别选取钴酸锂、镍钴锰酸锂、磷酸铁锂、锰酸锂作为正极材料，金属锂作为负极材料进行试验，收集了不同正极材料的正极配方、正极固含量、极片涂层厚度、正极压实密度等关键工艺参数，并将其工艺参数验证表列表 3~7 所示。表中数据表明本文件在 8.1.1（正极片的制备）小节中规定的关键工艺参数范围合理。

表 3 扣式半电池正极配比表

配方	正极活性物质：导电剂：PVDF
a	90%:5%:5%
b	93%:3.5%:3.5%
c	96%:2%:2%

表 4 钴酸锂半电池工艺参数验证表

正极配比	实验室	电池壳型号	正极固含量 (%)	极片涂层厚度 (μm)	压实密度 (g·cm <sup>-3</sup> )
a	实验室 1	CR2032	72.22	60	3.78
	实验室 3	CR2032	70.38	68	3.99
	实验室 4	CR2032	55.58	27.33	3.48
b	实验室 1	CR2032	55.58	42	3.77
	实验室 3	CR2032	59.82	41	3.99
	实验室 4	CR2032	26.67	49.61	3.09
c	实验室 1	CR2032	44.2	25	3.79
	实验室 3	CR2032	46	26	4.01
	实验室 4	CR2032	44.60	26.33	2.91

表 5 镍钴锰酸锂半电池工艺参数验证表

正极配比	实验室	电池壳型号	正极固含量 (%)	极片涂层厚度 (μm)	压实密度 (g·cm <sup>-3</sup> )
a	实验室 1	CR2032	62.31	52	3.35
	实验室 3	CR2032	59.92	49	3.33
	实验室 4	CR2032	55.23	26.33	3.08
b	实验室 1	CR2032	60.58	46	3.30
	实验室 3	CR2032	58.26	46	3.29
	实验室 4	CR2032	48.50	26.67	2.80
c	实验室 1	CR2032	53.31	27	3.35
	实验室 3	CR2032	46.04	28	3.27
	实验室 4	CR2032	42.59	27	2.87

表 6 磷酸铁锂半电池工艺参数验证表

正极配比	实验室	电池壳型号	正极固含量	极片涂层厚度	压实密度
------	-----	-------	-------	--------	------

			(%)	( $\mu\text{m}$ )	( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
a	实验室 1	CR2032	47.2	52	2.20
	实验室 3	CR2032	55.11	54	2.41
	实验室 4	CR2032	51.77	26.67	2.50
b	实验室 1	CR2032	44.51	44	2.21
	实验室 3	CR2032	50.12	46	2.41
	实验室 4	CR2032	46.66	26.33	2.35
c	实验室 1	CR2032	34.26	34	2.24
	实验室 3	CR2032	37.99	31	2.41
	实验室 4	CR2032	41.04	21	2.22

表 7 锰酸锂半电池工艺参数验证表

正极配比	实验室	电池壳型号	正极固含量 (%)	极片涂层厚度 ( $\mu\text{m}$ )	压实密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
a	实验室 3	CR2032	70.34	66	3.00
	实验室 4	CR2032	54.68	27	2.79
b	实验室 1	CR2032	48.23	40	3.00
	实验室 3	CR2032	60.19	54	3.00
	实验室 4	CR2032	48.56	27	2.65
c	实验室 1	CR2032	42.09	35	2.97
	实验室 3	CR2032	46.11	34	3.02
	实验室 4	CR2032	44.56	26.33	2.51

### 3.1.2 扣式半电池测试方法试验数据

对钴酸锂、镍钴锰酸锂、磷酸铁锂和锰酸锂分别进行了不同正极配比下扣式半电池性能的试验，将扣式半电池在进行循环充放电前后进行交流阻抗测试和计算，相关试验数据见表 8~表 11:

表 8 扣式半电池性能试验数据 (钴酸锂)

正极配比	a						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	$R_{\Omega}$	1.98	1.86	1.9	1.91	3.19
		$R_{ct}$	72.45	69.49	70.68	70.87	2.10
	循环后	$R_{\Omega}$	2.40	1.91	1.97	2.09	12.77
		$R_{sf}$	4.46	6.78	5.59	5.61	20.68
		$R_{ct}$	17.25	23.83	22.99	21.36	16.77
3	循环前	$R_{\Omega}$	3.81	3.10	3.79	3.57	11.42
		$R_{ct}$	240.00	223.00	225.00	229.33	4.05
	循环后	$R_{\Omega}$	5.36	4.06	4.41	4.61	14.63
		$R_{sf}$	0.98	0.90	0.96	0.95	4.40
		$R_{ct}$	39.40	32.99	41.27	37.89	11.46
正极配比	b						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	$R_{\Omega}$	2.23	2.41	2.56	2.40	6.88

		R <sub>ct</sub>	77.41	73.09	80.03	76.84	4.56
	循环后	R <sub>o</sub>	2.81	2.56	2.44	2.60	7.25
		R <sub>sf</sub>	6.08	6.77	7.15	6.67	8.14
		R <sub>ct</sub>	25.19	27.38	26.95	26.51	4.38
3	循环前	R <sub>o</sub>	2.61	2.66	2.56	2.61	1.92
		R <sub>ct</sub>	180.50	157.70	161.70	166.63	7.31
	循环后	R <sub>o</sub>	4.46	4.57	0.49	3.17	73.52
		R <sub>sf</sub>	0.77	0.77	0.89	0.81	8.54
		R <sub>ct</sub>	52.44	53.01	56.76	54.07	4.434
正极配比	c						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	R <sub>o</sub>	2.05	2.31	2.13	2.16	6.16
		R <sub>ct</sub>	63.17	60.43	61.39	61.66	2.25
	循环后	R <sub>o</sub>	3.14	3.45	3.66	3.42	7.66
		R <sub>sf</sub>	5.23	5.82	7.04	6.03	15.31
		R <sub>ct</sub>	30.43	28.95	29.04	29.47	2.82
3	循环前	R <sub>o</sub>	3.743	2.753	2.892	3.13	17.13
		R <sub>ct</sub>	223	238	219	226.67	4.42
	循环后	R <sub>o</sub>	5.528	3.305	3.703	4.18	28.37
		R <sub>sf</sub>	1.5	1.3	1.6	1.47	10.41
		R <sub>ct</sub>	70.69	66.8	61.2	66.23	7.20

表 9 扣式半电池性能试验数据（镍钴锰酸锂）

正极配比	a						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	R <sub>o</sub>	1.34	1.56	1.46	1.45	7.58
		R <sub>ct</sub>	67.45	73.26	71.89	70.87	4.29
	循环后	R <sub>o</sub>	1.66	1.59	1.57	1.61	2.94
		R <sub>sf</sub>	42.55	41.59	45.07	43.07	4.17
		R <sub>ct</sub>	13.68	15.97	16.23	15.29	9.18
2	循环前	R <sub>o</sub>	2.67	2.68	2.83	2.73	3.33
		R <sub>ct</sub>	108.50	90.60	90.60	96.57	10.70
	循环后	R <sub>o</sub>	2.80	3.89	4.13	3.60	19.65
		R <sub>sf</sub>	46.01	45.64	43.52	45.06	2.98
		R <sub>ct</sub>	27.17	28.23	25.63	27.01	4.84
正极配比	b						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	R <sub>o</sub>	1.65	1.57	1.55	1.59	3.33
		R <sub>ct</sub>	80.34	93.44	87.34	87.04	7.53
	循环后	R <sub>o</sub>	2.29	2.13	3.67	2.70	31.40
		R <sub>sf</sub>	33.35	32.56	32.72	32.88	1.27
		R <sub>ct</sub>	20.55	23.56	26.31	23.47	12.27

3	循环前	$R_{\Omega}$	2.91	2.59	3.32	2.94	12.4
		$R_{ct}$	117.40	113.60	108.70	113.23	3.85
	循环后	$R_{\Omega}$	3.96	4.04	3.92	3.97	1.51
		$R_{sf}$	47.25	46.60	48.00	47.28	1.48
		$R_{ct}$	31.94	30.36	30.95	31.08	2.57
正极配比	c						
实验室	测试项目	1#	2#	3#	均值	RSD/%	
1	循环前	$R_{\Omega}$	2.45	2.68	2.53	2.55	4.57
		$R_{ct}$	101.34	93.76	99.21	98.10	3.98
	循环后	$R_{\Omega}$	3.11	2.87	2.96	2.98	4.07
		$R_{sf}$	40.3	48.67	42.14	43.70	10.06
		$R_{ct}$	22.09	23.87	22.16	22.71	4.44
3	循环前	$R_{\Omega}$	3.73	2.67	2.82	3.08	18.6
		$R_{ct}$	131.10	130.90	166.90	142.97	14.5
	循环后	$R_{\Omega}$	3.85	3.79	3.71	3.78	1.88
		$R_{sf}$	66.58	70.41	71.64	69.54	3.79
		$R_{ct}$	40.41	40.40	44.73	41.85	5.97

表 10 扣式半电池性能试验数据（磷酸铁锂）

正极配比	a						
实验室	测试项目	1#	2#	3#	均值	RSD/%	
1	循环前	$R_{\Omega}$	1.11	0.98	1.03	1.04	6.31
		$R_{ct}$	30.34	36.97	32.76	33.36	10.06
	循环后	$R_{\Omega}$	1.39	1.58	1.44	1.47	6.70
		$R_{sf}$	3.15	3.58	5.06	3.93	25.49
		$R_{ct}$	11.81	10.52	10.36	10.90	7.30
3	循环前	$R_{\Omega}$	2.96	2.83	2.72	2.84	4.17
		$R_{ct}$	75.25	70.83	71.05	72.38	3.44
	循环后	$R_{\Omega}$	3.31	3.63	3.95	3.63	8.87
		$R_{sf}$	2.89	3.19	3.03	3.03	4.98
		$R_{ct}$	9.48	20.08	17.98	15.85	35.42
4	循环前	$R_{\Omega}$	0.98	0.97	0.95	0.97	1.58
		$R_{ct}$	20.67	19.85	21.27	20.60	3.46
	循环后	$R_{\Omega}$	1.58	1.38	1.36	1.44	8.45
		$R_{sf}$	4.96	5.54	5.05	5.18	6.02
		$R_{ct}$	11.45	13.78	11.79	12.34	10.20
正极配比	b						
实验室	测试项目	1#	2#	3#	均值	RSD/%	
1	循环前	$R_{\Omega}$	1.64	1.72	1.71	1.69	2.58
		$R_{ct}$	40.32	36.94	41.22	39.49	5.71
	循环后	$R_{\Omega}$	1.89	1.83	1.79	1.84	2.74
		$R_{sf}$	3.33	3.06	3.48	3.29	6.47

		$R_{ct}$	13.56	17.43	18.07	16.35	14.92
3	循环前	$R_o$	3.49	3.41	3.39	3.43	1.48
		$R_{ct}$	75.77	71.49	71.00	72.75	3.61
	循环后	$R_o$	3.61	3.72	3.71	3.68	1.66
		$R_{sf}$	3.28	3.00	3.42	3.23	6.50
		$R_{ct}$	9.72	9.44	10.84	10.00	7.39
4	循环前	$R_o$	2.07	1.77	1.72	1.85	10.21
		$R_{ct}$	25.15	22.84	26.86	24.95	8.09
	循环后	$R_o$	1.07	1.58	1.16	1.27	21.34
		$R_{sf}$	4.33	3.68	3.25	3.75	14.49
		$R_{ct}$	20.32	19.35	19.92	19.86	2.45
正极配比	c						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
1	循环前	$R_o$	1.63	1.54	1.70	1.62	4.94
		$R_{ct}$	51.33	54.76	56.91	54.33	5.18
	循环后	$R_o$	3.07	2.99	3.11	3.06	2.00
		$R_{sf}$	4.01	3.76	4.47	4.08	8.83
		$R_{ct}$	14.65	15.09	17.37	15.70	9.30
3	循环前	$R_o$	3.11	3.08	3.26	3.15	3.07
		$R_{ct}$	105.00	94.23	97.03	98.75	5.66
	循环后	$R_o$	3.42	3.46	3.72	3.53	4.62
		$R_{sf}$	5.21	5.08	4.50	4.93	7.65
		$R_{ct}$	11.34	10.77	8.74	10.28	13.30
4	循环前	$R_o$	1.37	1.23	2.55	1.72	42.24
		$R_{ct}$	38.61	38.02	43.9	40.18	8.06
	循环后	$R_o$	1.03	0.94	1.19	1.05	12.02
		$R_{sf}$	3.66	3.13	4.61	3.80	19.73
		$R_{ct}$	25.81	27.34	26.14	26.43	3.05

表 11 扣式半电池性能试验数据（锰酸锂）

正极配比	a						
实验室	测试项目		1#	2#	3#	均值	RSD/%
2	循环前	$R_o$	3.664	3.642	3.384	3.56	4.37
		$R_{ct}$	80	103	86	89.67	13.31
	循环后	$R_o$	6.744	5.978	5.865	6.20	7.72
		$R_{sf}$	5.3	5.05	5.6	5.32	5.18
		$R_{ct}$	18	20	23	20.33	12.38
3	循环前	$R_o$	1.73	1.1	1.18	1.34	25.66
		$R_{ct}$	59.09	58.96	55.32	57.79	3.70
	循环后	$R_o$	1.23	1.17	1.43	1.28	10.66
		$R_{sf}$	26.72	23.65	22.86	24.41	8.35
		$R_{ct}$	2.99	4.33	3.32	3.55	19.69

正极配比		b					
实验室	测试项目	1#	2#	3#	均值	RSD/%	
1	循环前	$R_{\Omega}$	2.22	2.43	2.49	2.38	5.96
		$R_{ct}$	65.54	67.78	69.1	67.47	2.67
	循环后	$R_{\Omega}$	2.02	2.13	2.27	2.14	5.86
		$R_{sf}$	11.43	13.62	13.27	12.77	9.21
		$R_{ct}$	4.56	5.98	7.10	5.88	21.65
3	循环前	$R_{\Omega}$	3.25	3.07	2.76	3.03	8.29
		$R_{ct}$	157.30	104.20	147.60	136.37	20.74
	循环后	$R_{\Omega}$	5.43	6.49	5.72	5.88	9.29
		$R_{sf}$	2.90	2.70	3.25	2.95	9.44
		$R_{ct}$	33.86	28.00	31.00	30.95	9.47
4	循环前	$R_{\Omega}$	0.65	1.1	0.95	0.90	25.46
		$R_{ct}$	68.2	72.45	72.29	70.98	3.39
	循环后	$R_{\Omega}$	1.3	1.02	0.94	1.09	17.40
		$R_{sf}$	25.54	21.63	20.68	22.62	11.39
		$R_{ct}$	2.47	10.69	8.5	7.22	58.96
正极配比		c					
实验室	测试项目	1#	2#	3#	均值	RSD/%	
1	循环前	$R_{\Omega}$	2.53	3.06	2.84	2.81	9.48
		$R_{ct}$	62.07	60.38	59.77	60.74	1.96
	循环后	$R_{\Omega}$	3.11	3.83	3.68	2.26	17.81
		$R_{sf}$	13.67	13.90	15.48	14.35	6.87
		$R_{ct}$	7.72	8.59	7.54	7.95	7.06
3	循环前	$R_{\Omega}$	3.00	2.97	3.51	3.16	9.70
		$R_{ct}$	120.1	124	137	127.03	6.97
	循环后	$R_{\Omega}$	6.255	6.735	6.29	6.43	4.17
		$R_{sf}$	2.90	3.60	2.90	3.13	12.90
		$R_{ct}$	41.00	44.00	43.00	42.67	3.58
4	循环前	$R_{\Omega}$	0.62	1.26	0.75	0.88	38.59
		$R_{ct}$	76.51	78.57	71.33	75.47	4.94
	循环后	$R_{\Omega}$	1.16	0.99	1.08	1.08	7.90
		$R_{sf}$	35.59	29.68	34.54	33.27	9.48
		$R_{ct}$	1.09	0.03	0	0.37	166.29

### 3.1.3 试验精密度分析

扣式半电池的组装涉及电极片制备（包括压实密度、固含量控制）、电解液注入及密封封装等多个关键环节，其工艺精度与一致性对电池内部界面状态及最终电化学性能测试结果具有直接影响，在 3.1.2 节中也能看出实验室间的数据差距较大，且有部分实验室的实验数据类型和其他实验室不一致，这是由于界面状态及电化学响应特性不同。

为确保测试数据在同一基准条件下获得，具备高度的可比性与重现性，并最大程度减少因个体操作差异引入的系统误差，所有扣式半电池均由经验丰富的专业人员使用标准化材料

与流程统一制作并分发。在测试过程中，给扣式半电池设定统一的循环充放电参数，再测试其电化学性能。

值得注意的是，由于扣式半电池采用金属锂对电极且封装体系相对开放，其内部界面在储存期间易受微量副反应及环境渗入的影响，长期储存可能导致其性能衰减或失效。因此，为确保数据可靠性，本研究对单位组内的测试数据进行了格拉布斯检验，以识别异常值。其中，若某数据点为歧离值，则以“\*”标注；若为离群值，则以“\*\*”标注。同时，在数据表中，包含歧离值或离群值的单元格（即对应  $G_{\max}$  或  $G_{\min}$  所在单元格）以灰色底纹突出显示。

对  $p=6$ ，格拉布斯检验 5%临界值为 1.887，1%临界值为 1.973；

对  $p=5$ ，格拉布斯检验 5%临界值为 1.715，1%临界值为 1.764；

对  $p=4$ ，格拉布斯检验 5%临界值为 1.481，1%临界值为 1.496。

表 12 LCO

实验室	测试项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	均值	RSD/ %	$G_{\max}$	$G_{\min}$	
1	循环前	$R_{\Omega}$	2.15	1.85	1.86	1.89	1.87	2.09	1.95	6.63	1.49	0.76
		$R_{ct}$	29.02	24.56	27.08	28.91	28.47	23.50	26.92	8.80	0.88	1.44
	循环后	$R_{\Omega}$	2.82	2.04	2.08	2.36	2.49	2.18	2.33	12.61	1.66	0.98
		$R_{sf}$	20.64	26.21	21.48	20.80	18.49	19.19	21.14	12.87	1.87	0.97
	$R_{ct}$	14.00	10.27	13.22	13.07	10.40	14.44	12.57	14.33	1.04	1.28	
2	循环前	$R_{\Omega}$	2.82	2.66	2.55	3.02	3.01	2.79	2.80	6.66	1.13	1.38
		$R_{ct}$	35.99	44.81	44.03	44.27	38.79	45.99	42.31	9.39	0.93	1.59
	循环后	$R_{\Omega}$	3.38	3.65	3.42	3.69	3.68	3.88	3.62	5.17	1.41	1.27
		$R_{sf}$	13.69	13.58	14.07	14.91	16.56	14.99	14.63	7.63	1.73	0.94
	$R_{ct}$	8.69	9.28	7.88	9.02	7.99	7.12	8.33	9.74	1.17	1.49	
3	循环前	$R_{\Omega}$	1.09	2.512	2.199	2.79	1.16	1.90	1.94	36.09	1.21	1.22
		$R_{ct}$	21.59	40.58	48.57	50.48	40.61	36.11	39.66	26.14	1.04	1.74
	循环后	$R_{\Omega}$	2.19	1.84	3.03	3.53	2.042	4.44	2.86	35.64	1.58	0.99
		$R_{sf}$	15.37	14.39	16.96	20.30	13.06	17.39	16.25	15.73	1.59	1.25
	$R_{ct}$	11.68	11.55	11.64	11.12	12.03	12.09	11.68	3.02	1.15	1.60	
4	循环前	$R_{\Omega}$	1.86	2.28	2.42	2.1	2.51	2.05	2.20	11.10	1.25	1.40
		$R_{ct}$	91.35	78.44	48.50	82.71	98.16	42.68	74.63	31.03	1.07	1.35
	循环后	$R_{\Omega}$	1.86	1.26	1.7	2.58	1.59	1.9	1.82	24.22	1.74	1.26
		$R_{sf}$	4.73	4.62	4.3	7.36	7.17	5.4	5.59	23.99	1.31	0.97
	$R_{ct}$	21.12	20.58	25.57	21.51	23.51	20.65	22.16	8.97	1.72	0.79	
5	循环前	$R_{\Omega}$	2.95	2.56	2.51	3.07	2.96	2.84	2.82	8.15	1.11	1.33
		$R_{ct}$	36.12	45.7	43.53	44.61	34.61	46.61	41.86	12.33	0.92	1.41
	循环后	$R_{\Omega}$	3.36	3.64	3.43	3.67	3.66	3.83	3.59	4.81	1.34	1.38
		$R_{sf}$	13.27	13.65	14.02	14.93	16.5	15.51	14.65	8.39	1.51	1.12
	$R_{ct}$	8.74	9.22	7.91	8.96	8.24	7.31	8.40	8.51	1.15	1.52	
6	循环前	$R_{\Omega}$	2.05**	1.59	1.42	1.64	1.99	1.43	1.68	9.71	2.23	1.64
		$R_{ct}$	42.49	50.63	46.80	46.42	45.33	37.45	44.85	9.98	1.29	1.65
	循环后	$R_{\Omega}$	3.45	2.20	2.01	4.15	2.09	1.79	2.61	36.49	1.61	0.86

		R <sub>sf</sub>	12.23	10.68	10.72	10.21	12.88	9.23	10.99	12.20	1.41	1.31
		R <sub>ct</sub>	6.63	7.29	7.40	7.46	6.40	7.27	7.07	6.30	0.87	1.52
7	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.63	1.89	1.49	1.71	1.58	1.59	1.65	8.34	1.74	1.15
		R <sub>ct</sub>	43.91	47.14	46.04	31.44	38.45	51.84	43.14	16.70	1.21	1.62
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.08	2.24	1.31	2.28	1.76	1.35	1.84	23.63	1.02	1.21
		R <sub>sf</sub>	26.42	25.27	35.51	21.98	28.5	24.35	27.01	17.39	1.81	1.07
		R <sub>ct</sub>	10.52	10.68	14.61	11.41	12.71	10.37	11.71	14.16	1.74	0.81
8	循环前	R <sub>Ω</sub>	4.39	4.59	6.55	5.70	5.88	9.35	6.07	29.60	1.82	0.94
		R <sub>ct</sub>	66.54	62.86	51.63	55.99	45.03	70.63	58.78	16.41	1.23	1.43
	循环后	R <sub>Ω</sub>	4.16	5.52	5.96	6.30	6.84	4.88	5.61	17.40	1.26	1.49
		R <sub>sf</sub>	33.02	34.34	38.04	39.60	32.05	26.05	33.85	14.21	1.20	1.62
		R <sub>ct</sub>	11.64	11.06	9.52	8.60	11.78	12.91	10.92	14.53	1.26	1.46
9	循环前	R <sub>Ω</sub>	4.14	2.19	2.41	3.63	2.426	2.56	2.89	27.50	1.57	0.88
		R <sub>ct</sub>	34.92	47.35	28.54	47.56	34.54	35.03	37.99	20.34	1.24	1.22
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.55	2.354	2.91	2.36	9.05**	1.99	3.54	76.83	2.03	0.57
		R <sub>sf</sub>	15.74	14.55	14.03	13.34	11.83	10.61	13.35	13.99	1.28	1.47
		R <sub>ct</sub>	12.47	13.38	14.8	12.73	13.21	16.42	13.83	10.86	1.72	0.91
10	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.22	3.48	3.63	3.23	2.44	9.01**	4.17	57.75	2.01	0.72
		R <sub>ct</sub>	41.17	49.83	45.20	48.85	66.47**	43.87	49.23	18.34	1.91	0.89
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.48	5.24**	3.30	2.70	2.14	2.36	3.03	37.92	1.92	0.78
		R <sub>sf</sub>	16.61	11.62	12.07	13.27	15.93	14.90	14.07	14.66	1.23	1.19
		R <sub>ct</sub>	29.69	23.75	29.37	27.13	28.27	24.44	27.11	9.26	1.03	1.34
11	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.19	1.29**	1.22	1.73	/	/	1.36	18.47	1.48	0.66
		R <sub>ct</sub>	126.60	109.10	101.90	110.50	/	/	112.03	9.30	1.40	0.97
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.11	2.49	3.20	2.99	/	/	2.70	18.16	1.02	1.19
		R <sub>sf</sub>	55.01	53.87	56.06	54.09	/	/	54.76	1.82	1.30	0.89
		R <sub>ct</sub>	60.16	56.93	51.83	47.42	/	/	54.09	10.38	1.08	1.19

表 13 LFP

实验室	测试项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	均值	RSD/ %	G <sub>max</sub>	G <sub>min</sub>	
1	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.04	2.27	1.892	2.01	2.27	1.87	2.04	8.59	1.33	0.95
		R <sub>ct</sub>	27.81	43.99	28.03	25.14	39.02	28.47	32.70	23.12	1.49	1.00
	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.59	1.719	2.34	2.00	2.077	1.89	1.93	13.82	1.52	1.29
		R <sub>sf</sub>	15.92	14.3	16.18	12.87	15.31	14.85	14.81	8.18	1.13	1.60
		R <sub>ct</sub>	12.16	10.12	13.64	7.33	9.95	7.73	9.94	24.68	1.51	1.07
2	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.63	2.19	2.22	1.99	2.09	2.66	2.30	12.27	1.29	1.09
		R <sub>ct</sub>	21.02	26.11	22.31	26.98	25.29	33.07	25.80	16.41	1.72	1.13
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.71	2.28	2.31	2.02	2.16	2.72	2.37	12.19	1.22	1.20
		R <sub>sf</sub>	6.21	5.89	5.77	5.97	6.89	7.22	6.33	9.37	1.51	0.94
		R <sub>ct</sub>	7.58	8.97	8.29	11.21	10.22	9.07	9.22	14.22	1.51	1.25
3	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.82	1.50	1.83	1.57	1.83	2.01	1.76	10.85	1.32	1.38
		R <sub>ct</sub>	59.58	39.91	25.74	43.89	46.33	32.69	41.36	28.29	1.56	1.33

	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.93	3.02*	2.16	1.84	1.90	1.59	2.07	24.06	1.90	0.97
		R <sub>sf</sub>	21.77	18.75	18.07	19.81	24.00	14.28	19.45	17.10	1.37	1.55
		R <sub>ct</sub>	4.11	5.98	4.26	5.59	6.29	6.17	5.40	17.98	0.92	1.33
4	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.35	2.79	2.33	1.88	2.44	2.89	2.45	14.83	1.22	1.56
		R <sub>ct</sub>	25.42	58.06	67.02	35.83	47.63	37.19	45.19	34.15	1.41	1.28
	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.43	1.47	1.36	1.47	1.10	1.20	1.34	11.55	0.85	1.54
		R <sub>sf</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
		R <sub>ct</sub>	15.88	18.98	18.48	18.98	15.04	17.70	17.51	9.58	0.88	1.47
5	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.79	2.25	2.17	1.92	2.27	2.39	2.30	12.50	1.71	1.32
		R <sub>ct</sub>	21.27	25.85	22.11	28.28	27.46	31.98	26.16	15.34	1.45	1.22
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.38	2.33	2.53	2.67	2.98	2.43	2.55	9.45	1.77	0.93
		R <sub>sf</sub>	2.55	2.45	2.58	2.79	2.68	3.20	2.71	9.87	1.84	0.97
		R <sub>ct</sub>	7.42	8.94	8.71	10.30	9.80	8.02	8.87	12.11	1.34	1.35
6	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.05	2.22	1.96	2.39	2.41	2.88	2.32	14.15	1.70	1.09
		R <sub>ct</sub>	20.60	35.62	36.10	21.75	30.99	39.36	30.74	25.64	1.09	1.29
	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.82	2.35	2.31	2.03	4.37	5.51	3.06	49.26	1.62	0.82
		R <sub>sf</sub>	1.25	1.70	2.47	2.03	0.91	0.88	1.54	41.47	1.45	1.03
		R <sub>ct</sub>	10.73	11.63	10.35	11.37	14.80	14.30	12.20	15.46	1.38	0.98
7	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.76	1.22	1.96	2.43	1.71	1.42	1.92	30.96	1.42	1.18
		R <sub>ct</sub>	26.01	37.49	34.44	32.13	20.29	32.51	30.48	20.52	1.12	1.63
	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.03	1.04	0.95	2.29*	1.26	1.44	1.33	37.61	1.91	0.76
		R <sub>sf</sub>	17.88	16.17	18.12	23.08	18.59	21.55	19.23	13.37	1.50	1.19
		R <sub>ct</sub>	7.33	16.89	5.94	11.57	20.71	13.02	12.57	44.63	1.45	1.18
8	循环前	R <sub>Ω</sub>	10.07	10.60	5.70	12.62	10.23	7.20	9.40	26.69	1.28	1.48
		R <sub>ct</sub>	99.12	67.41	85.20	50.38	84.79	48.64	72.59	28.27	1.29	1.17
	循环后	R <sub>Ω</sub>	5.79	4.28	7.36	2.51	7.57	2.44	4.99	45.78	1.13	1.12
		R <sub>sf</sub>	34.87	27.69	25.01	21.36	23.72	46.86	29.92	31.79	1.78	0.90
		R <sub>ct</sub>	3.29	3.41	6.11	7.14	6.23	10.67	6.14	44.35	1.66	1.05
9	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.61	2.60	2.58	2.19	3.05	2.43	2.41	20.04	1.33	1.65
		R <sub>ct</sub>	50.93	49.59	31.85	55.83	19.13	28.64	39.33	37.55	1.12	1.37
	循环后	R <sub>Ω</sub>	3.32	1.94	4.22	1.88	4.67	2.26	3.05	39.65	1.34	0.97
		R <sub>sf</sub>	15.98	12.23	17.08	13.80	15.19	13.32	14.60	12.37	1.37	1.31
		R <sub>ct</sub>	28.12	15.36	21.40	24.53	21.97	21.72	22.18	18.93	1.41	1.62
11	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.66	2.95	1.91	2.25	/	/	2.44	18.72	1.11	1.16
		R <sub>ct</sub>	61.03	62.23	65.60	56.84	/	/	61.43	5.89	1.15	1.27
	循环后	R <sub>Ω</sub>	1.16	1.67	1.89	2.18	/	/	1.72	25.01	1.06	1.31
		R <sub>sf</sub>	13.94	12.85	12.57	20.24*	/	/	14.90	24.22	1.48	0.65
		R <sub>ct</sub>	18.03	16.41	19.21	29.01	/	/	20.67	27.49	1.47	0.75

表 14 NCM

实验室	测试项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	均值	RSD/ %	G <sub>max</sub>	G <sub>min</sub>	
1	循环前	R <sub>Ω</sub>	4.33	4.18	3.784	3.84	/	/	4.03	6.54	1.12	0.95

		R <sub>ct</sub>	77.8	85.62	66.62	55.94	/	/	71.49	18.15	1.09	1.20
	循环后	R <sub>Ω</sub>	3.943	3.946	3.86	3.81	/	/	3.89	1.71	0.85	1.20
		R <sub>sf</sub>	9.14	9.315	9.59	9.362	/	/	9.35	1.98	1.29	1.14
		R <sub>ct</sub>	89.7	73.89	75.25	74.3	/	/	78.28	9.75	1.50	0.58
2	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.54	4.17	4.55	4.02	4.11	5.28	4.27	13.75	1.70	1.26
		R <sub>ct</sub>	95.27	97.7	91.23	84.97	98.89	101.2	94.87	6.25	1.07	1.67
	循环后	R <sub>Ω</sub>	7.05	6.81	7.99	8.28	7.55	8.21	7.64	8.06	1.02	1.36
		R <sub>ct</sub>	23.11	23.32	27.19	25.21	29.81	23.88	25.42	10.34	1.67	0.88
3	循环前	R <sub>Ω</sub>	2.87	2.87	2.19	1.86	0.53	1.11	1.91	49.61	1.02	1.46
		R <sub>ct</sub>	550.50	541.60	728.30	567.90	615.20	674.10	612.93	12.22	1.54	0.95
	循环后	R <sub>Ω</sub>	5.91	5.83	4.49	4.12	2.65	3.76	4.46	28.14	1.15	1.45
		R <sub>ct</sub>	6.78	6.98	4.02	3.61	6.47	7.20	5.84	27.34	0.85	1.40
5	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.2	4.23	4.62	3.75	4.03	5.21	4.17	16.09	1.49	1.40
		R <sub>ct</sub>	94.71	97.6	90.32	85.47	99.36	100.10	94.59	6.05	0.96	1.59
	循环后	R <sub>Ω</sub>	7.03	6.99	8.32	8.19	7.34	7.28	7.53	7.75	1.36	0.92
		R <sub>ct</sub>	22.08	23.21	27.36	24.68	29.5	23.79	25.10	11.13	1.57	1.08
6	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.58	5.29	6.32	5.23	/	/	5.10	22.34	1.07	1.35
		R <sub>ct</sub>	201.70	188.80	201.70	258.30	/	/	212.62	14.60	1.47	0.77
	循环后	R <sub>Ω</sub>	3.55	3.61	6.19**	3.56	/	/	4.223	31.00	1.50	0.52
		R <sub>ct</sub>	32.18	32.1	50.52	24.97	/	/	34.94	31.52	1.43	0.91
8	循环前	R <sub>Ω</sub>	5.05	6.79	5.58	1.25	/	/	4.66	51.25	0.89	1.43
		R <sub>ct</sub>	212.20	221.10	452.30**	225.30	/	/	277.73	41.95	1.50	0.56
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.44	2.88	2.76	3.32	/	/	2.84	12.76	1.29	1.13
		R <sub>ct</sub>	145.10	87.38	57.09	62.53	/	/	88.03	45.75	1.42	0.77
11	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.11	1.96	1.44	1.64	/	/	1.54	23.24	1.18	1.21
		R <sub>ct</sub>	102.2	101.2	102.2	98.43	/	/	101.01	1.76	0.67	1.45
	循环后	R <sub>Ω</sub>	2.378	2.917	2.541	2.729	/	/	2.64	8.83	1.18	1.13
		R <sub>ct</sub>	37.79	38.28	40.94	44.2	/	/	40.30	7.30	1.32	0.85

表 15 LMO

实验室	测试项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	均值	RSD/ %	G <sub>max</sub>	G <sub>min</sub>	
1	循环前	R <sub>Ω</sub>	5.17	5.13	5.32	4.65	/	/	5.07	5.75	0.88	1.44
		R <sub>ct</sub>	349.7	360	343.9	419.6	/	/	368.3	9.46	1.47	0.70
	循环后	R <sub>Ω</sub>	6.278	6.094	6.31	6.253	/	/	6.23	1.54	0.79	1.46
		R <sub>ct</sub>	6.482	5.556	6.596	5.769	/	/	6.10	8.45	0.96	1.06
2	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.19	3.61	2.98	3.03	3.12	2.91	3.14	7.99	1.87	0.92

	循环后	R <sub>ct</sub>	198.20	239.10	271.90	299.70	271.10	241.70	253.61	13.87	1.31	1.58
		R <sub>Ω</sub>	5.97	4.81	4.99	6.02	5.56	5.71	5.51	9.16	1.01	1.39
		R <sub>sf</sub>	15.11	8.97	9.21	10.51	12.87	12.97	11.61	20.97	1.44	1.08
		R <sub>ct</sub>	5.59	4.97	7.51	8.11	6.47	7.09	6.62	17.91	1.25	1.39
3	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.00	2.02	0.37	0.89	1.34	3.71	1.56	76.30	1.81	1.00
		R <sub>ct</sub>	524.50	327.00	541.10	515.50	363.10	484.50	459.28	19.83	0.90	1.45
	循环后	R <sub>Ω</sub>	6.86	6.99	8.73	7.48	6.73	6.18	7.15	12.21	1.79	1.12
		R <sub>sf</sub>	9.005	20.33	26.74	29.1	8.62	12.28	17.67	50.97	1.27	1.01
		R <sub>ct</sub>	7.91	5.23	3.64	4.49	5.07	4.94	5.21	27.61	1.87	1.09
5	循环前	R <sub>Ω</sub>	3.14	3.58*	2.93	2.95	3.11	2.96	3.11	7.90	1.90	0.74
		R <sub>ct</sub>	329.20	254.50	321.40	380.1	305.40	279.60	311.70	13.93	1.58	1.32
	循环后	R <sub>Ω</sub>	6.37	4.74	4.86	5.76	5.39	5.63	5.46	11.08	1.51	1.19
		R <sub>sf</sub>	14.07	9.11	9.76	10.24	12.34	13.31	11.47	17.83	1.27	1.15
		R <sub>ct</sub>	5.67	5.02	7.37	8.03	6.24	6.95	6.54	17.06	1.33	1.37
6	循环前	R <sub>Ω</sub>	6.04	0.36	4.36	0.20	0.47	/	2.28	119.40	1.38	0.77
		R <sub>ct</sub>	155.10	467.70	228.90	632.40	474.80	/	391.78	49.94	1.23	1.21
	循环后	R <sub>Ω</sub>	4.78	5.87	4.09	5.18	4.53	/	4.88	13.76	1.47	1.18
		R <sub>sf</sub>	8.03	6.02	6.19	7.50	6.35	/	6.819	13.09	1.36	0.90
		R <sub>ct</sub>	2.53	17.03	4.51	1.98	18.91	/	8.99	92.04	1.20	0.85
8	循环前	R <sub>Ω</sub>	1.84	2.63	4.01	3.14	/	/	2.90	31.41	1.21	1.17
		R <sub>ct</sub>	395.40	362.20	80.36	130.40	/	/	242.09	65.99	0.96	1.01
	循环后	R <sub>Ω</sub>	7.90	7.29	5.97	4.35	/	/	6.37	24.73	0.97	1.29
		R <sub>sf</sub>	13.86	10.02	7.60	9.83	/	/	10.33	25.16	1.36	1.05
		R <sub>ct</sub>	7.72	6.54	6.99	4.27	/	/	6.38	23.34	0.90	1.42
11	循环前	R <sub>Ω</sub>	0.91	2.30	0.16	1.17	/	/	1.14	77.93	1.31	1.10
		R <sub>ct</sub>	168.40	166.80	212.60	204.80	/	/	188.15	12.73	1.02	0.89
	循环后	R <sub>Ω</sub>	8.87	9.83	7.40	8.19	/	/	8.57	12.02	1.22	1.13
		R <sub>sf</sub>	50.93	52.12	41.60	45.30	/	/	47.49	10.37	0.94	1.20
		R <sub>ct</sub>	70.35	93.74	48.06	51.45	/	/	65.90	31.85	1.33	0.85

### 3.1.4 实验数据允许差确定

由表 12-表 15 可以看出，有部分单位的数据中存在离群值，予以剔除后再进行 RSD 计算。同一实验室、同一批次、同一电化学状态时测得的电器元件值的相对标准偏差不超过 20%。

## 3.2 预期达到的社会效益等情况

### 3.2.1 标准制定的必要性

#### 3.2.1.1 行业需求

锂离子电池的性能不仅取决于正极材料的晶体结构等静态属性，更与其动态的电化学过程息息相关。这些过程，如锂离子在电极材料内部的扩散、在电极/电解液界面的迁移以及

电荷转移反应动力学，直接决定了电池的倍率性能、循环寿命和低温性能等关键指标。为了深入解析这些复杂的内部机制，从动力学层面进行精准表征显得尤为重要。交流阻抗谱（Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS）作为一种强大的频域测试技术，能够无损地探测电池内部的多种动力学过程，并通过建立等效电路模型对其进行分离和量化。

因此，为了科学评估和提升锂离子电池正极材料的综合电化学性能，制定统一、规范的交流阻抗测试方法标准至关重要。通过精确测量和分析材料的阻抗谱，可以更深入地理解其内部的动力学机制，从而指导材料界面改性、结构优化与电解液匹配，以满足高功率、长寿命等不同应用场景下的特定需求。准确掌握正极材料的动力学参数不仅有助于揭示现有材料性能瓶颈的根源，还为开发新型高性能电池材料提供了关键的理论依据和评价工具。

### 3.2.1.2 产品标准无配套交流阻抗的测定方法标准

目前，诸如 YS/T798-2012《镍钴锰酸锂》、YS/T1027-2015《磷酸铁锂》、GB/T20252-2014《钴酸锂》等各类正极材料产品标准，主要侧重于化学成分、物理指标和基础电化学性能（如克容量、循环性能）的规定。对于如何定量表征材料的关键动力学参数，如电荷转移电阻（ $R_{ct}$ ）和固液界面膜阻抗，尚缺乏配套的、统一的测试方法标准。

### 3.2.2 标准制定的可行性

EIS 测试结果极易受到测试设备、测试参数（如激励信号振幅、频率范围）、电极制备工艺、电解液环境、电池荷电状态（SOC）和测试温度等诸多因素的影响。测试条件的不统一，极易导致对同一材料的分析结果出现巨大差异，引发不必要的商业纠纷和技术误导。本标准的制定将有效避免因测试方法不同而导致的结果争议，减少贸易摩擦，提高锂离子电池正极材料动力学性能测试的准确性、可靠性和重复性。据调查，EIS 技术已成为国内外科研机构及锂电企业研究和评价正极材料电化学性能的常规手段。业内普遍采用三电极体系或对称电池/半电池体系，对正极材料进行 EIS 测试，并通过建立适当的等效电路模型对图谱进行拟合。目前，该方法在应用层面已相当成熟，但缺乏标准化的操作指南和数据分析规范。因此，制定此项标准技术基础坚实，行业需求迫切，且易于推广和应用。

### 3.2.3 标准预期产生的经济效益和社会效益

本标准的制定与实施，将填补锂离子电池正极材料动力学性能测试方法标准的空白，完善正极材料评价标准体系。它将使材料生产企业、电池厂商、新能源汽车企业及第三方检测机构“有标可依”，显著降低因测试误差和争议造成的研发成本、质量成本和交易成本。本标准通过推动动力学性能评价的标准化，将引导正极材料产业从“经验驱动”向“数据驱动”升级，加速高性能材料的研发与应用进程，促进锂离子电池行业整体技术水平的提升。

## 四、与国际国外同类标准技术内容对比情况

#### 4.1 采用国际标准和国外先进标准的程度

经查，国外无相同类型的标准。

#### 4.2 国际、国外同类标准水平的对比分析

经查，国外无相同类型的标准。

#### 4.3 与现有标准及制定中标准协调配套的情况

经查，标准与现有标准及制定中的标准无重复交叉情况。

### 五、以国际标准为基础的起草情况

没有以国际标准为基础进行起草。

### 六、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

与有关的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

### 七、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧。

### 八、涉及专利的有关说明

不涉及专利。

### 九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议。

建议作为推荐性行业标准。由于本标准反映了采用交流阻抗法测试锂离子电池正极材料的电化学性能测试方法及其可靠性，因此可积极向厂家及国内外用户推荐采用本标准。

### 十、其他应予说明的事项

无。

《锂离子电池正极材料电化学性能测试交流阻抗测试方法》标准编制组  
二〇二六年三月