**国家标准**

**镍锰酸锂电化学性能测试**

**首次放电比容量及首次充放电效率测试方法**

**编**

**制**

**说**

**明**

**（审查稿）**

**广东邦普循环科技有限公司**

**2022年10月**

**一、工作简况**

**1.1 任务来源**

根据国家标准化管理委员会《关于下达2021年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2021〕12号）的文件，国家标准《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）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20210826-T-610，项目计划完成年限为2023年。

标准编制组单位有广东邦普循环科技有限公司、湖南长远锂科股份有限公司、蜂巢能源科技有限公司、天津国安盟固利新材料科技股份有限公司、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司、宁波容百新能源科技股份有限公司、成都巴莫科技有限责任公司、广东佳纳能源科技有限公司、宜昌邦普时代新能源有限公司、北大泰丰先行新能源科技有限公司、合肥国轩电池材料有限公司、厦门厦钨新能源材料股份有限公司。

**1.2主要参加单位和工作成员及其所作的工作**

**1.2.1 起草单位简介**

广东邦普循环科技有限公司（简称“邦普循环”）创立于2005年，是国内领先的废旧电池循环利用企业，聚焦回收业务、资源业务与材料业务，为电池全生命周期管理提供一站式闭环解决方案和服务。作为宁德时代新能源科技股份有限公司的控股子公司，邦普循环打造了上下游优势互补的电池全产业链循环体系，通过独创的定向循环技术，在全球废旧电池回收领域率先破解了“废料还原”的行业性难题，电池产品核心金属材料总回收率达到99.3%以上，荣获国家技术创新示范企业、国家绿色工厂、工信部制造业单项冠军示范企业等荣誉称号。

邦普循环总部位于广东省佛山市，目前在全球已设立广东佛山、湖南长沙、福建宁德、湖北宜昌、印尼莫罗瓦利、印尼纬达贝七大生产基地；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。

截至2021年12月31日，邦普循环已参与制修订废旧电池回收、电池材料等相关标准204项，其中发布154项；申请专利930件；荣获2021年国家技术创新示范企业、2021年工信部制造业单项冠军示范企业、2021年广东省专精特新企业、2021年佛山企业百强、2019年度广东省科技进步奖一等奖等荣誉。

**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电化学性能的测试方法，对比分析，结合检测中心的测试方法，选择扣式半电池和扣式全电池法测定镍锰酸锂的首次放电比容量及首次充放电效率，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分析测试工程师、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。

一验单位湖南长远锂科股份有限公司、蜂巢能源科技有限公司负责对试验报告中的工艺参数进行验证，提供一验报告。

二验单位天津国安盟固利新材料科技股份有限公司、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司、宁波容百新能源科技股份有限公司、成都巴莫科技有限责任公司、广东佳纳能源科技有限公司、宜昌邦普时代新能源有限公司、北大泰丰先行新能源科技有限公司对试验报告中的条件试验进行验证工作，提供二验报告。

合肥国轩电池材料有限公司、厦门厦钨新能源材料股份有限公司为标准文本提供宝贵的意见。

其中样品提供单位为：广东邦普循环科技有限公司、湖南长远锂科股份有限公司、蜂巢能源科技有限公司。

**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** |
| 唐剑骁、戴海桃、明帮来、梁裕铿 | 负责样品收集、标准文本起草、标准编制说明撰写，意见汇总处理，参加标准讨论和审定会议 |
| 廖达前、吴珊珊、xxx、凌仕刚、岳云飞、冯焕村、訚硕、魏琼、夏占国 | 负责对试验方案和试验条件进行验证，对标准技术内容进行审核，参加标准工作会议等 |
| 林锦绣、邵蓉蓉、xxx、靳佳、裴雪莲、郑佳玲、周茜、陈玉君、阮丁山、姜晓瑞、刘晓玲、饶媛媛、汪志全、魏丽英、杨凡 | 提供精密度测试数据；对标准文本提出修改意见 |

**1.3 主要工作过程**

**1.3.1 立项阶段**

2021年4月30日，国家标准化管理委员会下达2021年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知（国标委发〔2021〕12号），国家标准《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》立项成功。

**1.3.2 起草阶段**

2021年7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、湖南长远锂科股份有限公司、蜂巢能源科技有限公司、天津国安盟固利新材料科技股份有限公司、合肥国轩电池材料有限公司、宁波容百新能源科技股份有限公司、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司、北大泰丰先行新能源科技有限公司、北京当升材料科技股份有限公司、广西分析检测研究中心等单位参加了会议，会议对《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》进行了任务落实。

2021年8月至2022年4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，主要由电化学分析检测工作人员组成，根据产品的性质，结合扣式半电池和扣式全电池制作方法以及试验结果，形成了标准讨论稿。

2022年5月10日，全国有色金属标准化技术委员会组织召开了国家标准《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》的线上讨论会，来自广东邦普循环科技有限公司、湖南长远锂科股份有限公司、蜂巢能源科技有限公司、天津国安盟固利新材料科技股份有限公司、合肥国轩电池材料有限公司、宁波容百新能源科技股份有限公司、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司、北大泰丰先行新能源科技有限公司等多家单位的代表对《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》的标准讨论稿和编制说明进行了仔细、认真的讨论，并提出了修改意见和建议。

2022年5月，标准编制组向各参编单位发送标准文本和试验条件调研表，对标准中涉及的技术参数和试验方法开展了调研，形成了试验方案。

2022年6月~7月，本编制组将修改后的标准讨论稿、试验方案连同样品统一寄给各验证单位，开展验证试验。

2022年8月~9月，标准编制组陆续收到各验证单位发来的验证报告，对试验数据进行汇总、统计和分析，完善标准征求意见稿和编制说明，形成征求意见稿。

**1.3.3 征求意见阶段**

2022年9月，本编制组通过发函和在中国有色金属标准质量信息网上公开等形式对《镍锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》标准征求意见稿进行意见征询。同时以函件、邮件等形式外发20家单位进行征求意见，回函并有建议或意见的单位数8个，回函没有意见的单位数12个，没有回函的单位数0个。编制组根据回函意见，经讨论研究，给出处理意见。

2022年9月21日，全国有色金属标准化技术委员会在山西省太原市召开了有色金属标准工作会议，来自广东邦普循环科技有限公司、湖南长远锂科股份有限公司、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、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司、成都巴莫科技有限责任公司、厦门厦钨新能源材料有限公司等单位参与会议。会议中各单位代表就国家标准预审稿和编制说明进行讨论。（详见《标准征求意见稿意见汇总处理表》）

2022年10月，标准编制小组根据太原会议中各家单位提出的意见，对标准文本和编制说明进行修改，同时对试验数据进行补充，形成审定稿。

**1.3.3 审查阶段**

2022年11月3日，全国有色金属标准化技术委员会在福建厦门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、湖南长远锂科股份有限公司、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、中伟新材料股份有限公司、格林美股份有限公司…..等单位参与会议。会议中对标准审查稿及编制说明进行审查，….

**1.3.4 报批阶段**

xxxxx

**二、 标准编制原则**

1、本标准按GB/T 1.1-2020《 标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写规则》要求编写。

2、试验方法选择遵循测定结果准确度高、精密度高的原则，同时考虑检测成本、便捷等问题。确保标准的制定符合科学性、先进性，提高标准的适用性和可操作性。

3、满足镍锰酸锂正极材料的研究、生产、使用等需要为原则，提高标准的适用性和创新性。

**三、确定标准主要内容的依据**

本标准是首次制定，并且是在充分调研了镍锰酸锂正极材料生产和应用的实际情况和相关标准、文献资料的基础上完成的。

**3.1 测试方法的确定**

本标准适用于镍锰酸锂正极材料首次充电比容量和首次充放电效率的测定。标准的适用范围是在充分考虑和调研行业内镍锰酸锂正极材料电化学性能指标的基础上制定的。目前行业内主要通过制备扣式电池评价钴酸锂、锰酸锂、镍钴锰酸锂等锂离子电池正极材料的首次充电比容量和首次充放电效率，相比于软包电池测试电化学性能的方法，该方法操作简单、快捷，常作为快速评价手段。

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，测试结果更能代表镍锰酸锂的电化学性能。扣式全电池是采用镍锰酸锂作为正极、人造石墨作为负极，是对材料在实际电池中应用的模拟，可以为材料后续的实际应用提供参考。基于目前两种测试方法均有其应用场景，因此本标准使用扣式半电池法和扣式全电池法评价镍锰酸锂正极材料的首次充电比容量和首次充放电效率。

**3.2标准主要内容说明**

标准文件正文部分分为9章，其中第1章、第2章和第3章为规范性一般要素，包括范围、规范性引用文件及术语和定义，第4章~第9章为规范性技术要素，包括试剂和原料、仪器和设备、试验步骤、试验数据处理、允许差和检测报告。

第1章 范围：本文件规定了锂离子电池正极活性物质镍锰酸锂的首次放电比容量及首次充放电效率测试方法。本文件适用于扣式电池法测试锂离子电池正极活性物质镍锰酸锂首次放电比容量及首次充放电效率的测试。

第2章 规范性引用文件：本文件没有规范性引用文件。

第3章 术语和定义：本文件没有需要界定的术语和定义。

第4章 试剂和原料：试剂和原料章节规定了本文件扣式半电池和扣式全电池需要用到的各种试剂和原料清单，所述试剂和原料按照出现的先后顺序罗列。对于试剂和原料主要给出了潜在影响实际试验效果的关键参数要求，因镍锰酸锂产品对电解液的电化学稳定性要求较高，常规的电解液无法满足其要求。而耐高电压电解液目前仍处于发展和试验阶段，材料和技术上仍未十分成熟，同时不同的电解液企业生产产品存在一定差异。因此本标准中未给出锂离子电池电解液具体的原料配比，企业应根据镍锰酸锂正极材料的特性以及充放电截止电压选用合适的耐高电压电解液。对于已经商品化的标准结构件不再阐述各个部件的具体参数，对于需要进一步加工的原料或试剂已在标准文本的6.1.1和6.2.1预处理章节中。

本测试方法采用制备扣式半电池和扣式全电池来检测镍锰酸锂的电化学性能，扣式半电池主要由以下几个部件组成：负极壳、泡沫镍片（或弹片和垫片）、金属锂片、隔膜、电解液、正极极片、正极壳。扣式全电池主要由以下几个部分组成：负极壳、弹片、垫片、负极极片、隔膜、电解液、正极极片、正极壳。常用的扣式电池壳为CR2016、CR2025、CR2032、CR2430等，C代表纽扣式模拟电池，R代表电池外形为圆形。前两位数字为直径（单位mm），后两位数字为厚度（单位 0.1 mm），取两者的接近数字。例如 CR2032 的尺寸为直径20 mm，厚度3.2 mm。

第5章 仪器和设备的确定：仪器和设备章节规定了本文件试验步骤中需要用到的各种仪器和设备清单，所述仪器和设备按照其在本文出现的先后顺序罗列，对于仪器和设备主要给出了潜在影响实际试验效果的关键参数要求。惰性气体手套箱用于电池的制作，扣式电池封装机用于电池的封装，锂离子电池电化学性能测试仪用于电池的测试。

由于电池材料中的水分含量是电芯中水分的主要来源之一，且环境湿度越大，电池材料越容易吸收空气中的水分；反之，环境湿度控制越好，电池材料吸收空气中水分的能力越有限。因此，本文件中的试验应在前处理干燥房中进行，并严格控制前处理干燥房的温度和湿度。

第6章 试验步骤：规定了本文件中扣式半电池和扣式全电池的制备及测试要求，是本文件的核心章节，按照扣式半电池和扣式全电池两种不同测试方法将本章分成6.1扣式半电池（仲裁法）和6.2扣式全电池两小节，为避免相关方在方法选择上产生分歧，同时考虑到目前扣式半电池法应用面更广，数据更为稳定，因此在标准中将扣式半电池法定为仲裁法。每节按照操作流程顺序的方式进行编排，重点关注试验步骤的科学性、规范性、可操作性，对于可能引起重大分歧不宜给出具体参数的条款，本章节给出了合理的范围并规定操作过程。

6.1 扣式半电池试验步骤：本节主要规定了扣式半电池试验步骤，根据企业实际操作并结合调研结果规定了正极活性物质的配比、固含量和压实密度的范围。在标准文本中6.1.4电池测试一节，引入了恒流充放电电流计算方法，以科学并合乎实际要求的方式引入了材料的理论比容量作为充放电电流设置的输入参数；在充、放电制度的设置上，通过科学系统的试验并结合高电压镍锰酸锂材料的特性，采用了倍率0.1 C测试制度，充电截止电压为4.95 V，增加恒压充电工序，将放电截止电压规定到3.0 V。

6.2 扣式全电池试验步骤：本节主要规定了扣式全电池试验步骤，根据企业实际操作并结合调研结果规定了正、负极活性物质的配比、固含量和压实密度的范围。在标准文本中6.2.3负极片制备一节，引入了CB值（也叫N/P比），CB值应大于1。出于安全设计考虑，CB值一般为1.05~1.2，主要为了防止负极析锂，但也不能过大，过大容易造成电池不可逆容量损失，导致电池容量偏低，电池能量密度也会降低。通过选定合适的CB值，按照标准文本中公式（6）来计算负极材料的理论质量。在标准文本中6.2.3.4负极片制作一节中，为防止正负极片错位造成严重影响，负极片直径应大于正极片直径。

标准文本中6.2.5电池化成与测试一节中，给出了电池化成和定容的流程。扣式全电池用人造石墨作为负极，因为石墨负极材料和金属锂片的电极电位差值在0.05 V~0.1 V之间，且为了减少电解液分解和增加批次电化学性能的一致性，将电位再降低0.05 V，即扣式全电池最高充电截止电位为4.8 V。分四步进行化成，先以0.02 C的小倍率充到3.4 V，把电芯激活；再以0.1 C倍率充电至3.75 V，让电极表面形成稳定的SEI膜；再用1/3 C倍率充电至截止电位4.8 V；最后转恒压充电，截止电流0.05 C，减小电化学极化的影响。充电后静置10 min以上，先以1/3 C倍率放电至3.0 V；再静置10 min以上，以0.05 C小倍率放电至3.0 V，以减小电化学极化的影响，保证测试电池充分放电。

第7章 试验数据处理：给出了首次放电比容量（7.2）和首次充放电效率（7.3）的计算公式，单位要求及计算的精度要求。

第8章 允许差： 根据扣式半电池和扣式全电池电化学性能的测试结果精密度以及重复性和再现性分析，规定了扣式半电池和扣式全电池首次放电比容量和首次充放电效率的允许差。

第9章 检测报告：规定了报告所包含的必备要求内容，包括样品名称及批次、检测结果、检测日期、本文件中未规定的或视为可选的操作、可能影响检测结果的情况和本文件的编号。

**3.3 镍锰酸锂首次放电比容量及首次充放电效率电化学性能的验证**

**3.3.1 试样的物性指标**

电化学性能试验验证选取的镍锰酸锂样品的主要物性指标如下表所示：

表2 本实验所用镍锰酸锂样品的主要物性指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **样品编号** | **中位径D50（μm）** | **振实密度（g/cm3）** | **比表面积BET（m2/g）** |
| I | 3.40 | 2.90 | 1.03 |
| II | 5.61 | 1.80 | 0.94 |
| III | 8.57 | 1.79 | 0.84 |

**3.3.2 验证的工艺参数**

扣式半电池法涉及3个不同的镍锰酸锂正极配比。扣式半电池正极片的活性物质参数见表3：

表3 扣式半电池配比表

|  |  |
| --- | --- |
| **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% |

扣式全电池法涉及3个不同的镍锰酸锂正极配比和3个不同的石墨负极配比。扣式全电池正极和负极极片的活性物质配比参数见表4：

表4 扣式全电池配比表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **配方** | **正极活性物质:导电剂:PVDF** | **负极活性物质: 导电剂: CMC: SBR** |
| A | 90%：5%：5% | 94.5%：1.5%：1.5%：2.5% |
| B | 93%：3.5%：3.5% |
| C | 96%：2%：2% |
| D | 93%：3.5%：3.5% | 90%：3%：3%：4% |
| E | 96%：1%：1%：2% |

**3.3.3 电解液的选择**

尖晶石型镍锰酸锂材料具有4.7 V的电压平台，可以有效提高电池的能量密度。但也对电池内电解液、集流体等组分在高电压下工作的稳定性提出了更严峻考验。本编制组按I-a配方并分别采用常规的和耐高电压的电解液组装扣式电池，研究电解液稳定性对电化学性能的影响。广东邦普循环科技有限公司、蜂巢能源科技有限公司和成都巴莫科技有限责任公司开展了本次验证，验证结果见表5：

表5 不同电解液下的电化学性能数据平均值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **电解液** | **常规电解液** | | | **耐高电压电解液** | | |
| 测试项目  实验室 | C (mA. h/g) | Cm (mA. h/g) | η（%） | C (mA. h/g) | Cm (mA. h/g) | η（%） |
| ① | 165.6 | 130.2 | 78.6 | 144.9 | 133.4 | 92.1 |
| ② | 163.3 | 133.6 | 81.8 | 143.5 | 132.0 | 92.0 |
| ③ | 174.2 | 121.2 | 69.6 | 144.8 | 133.1 | 91.9 |
| 平均值 | 167.7 | 128.3 | 76.7 | 144.4 | 132.8 | 92.0 |

镍锰酸锂的标称容量为148 mA. h/g。从验证结果来看，采用常规电解液的扣式电池首次充电阶段的实际容量高出理论容量值的13%，内部因电解液分解存在不可逆电化学反应，造成首次库伦效率偏低，不能真实地反应镍锰酸锂的电化学性能。因此，各验证单位应根据尖晶石镍锰酸锂正极材料的特性选用合适的耐高电压电解液开展验证工作。

**3.3.4 测试方法可靠性验证**

针对经工作组内部讨论达成一致意见的试验方案开展验证工作，收集来自3家不同厂家的样品，于2022年6月发送至各验证单位，并将各参与单位分组进行不同正极配比下扣式电池首次放电比容量及首次充放电效率测试方法的验证工作，验证电池制备过程中本文件工艺参数的广泛性和适用性。扣式半电池和扣式全电池工艺参数验证表见表6和表7：

表6 扣式半电池工艺参数验证表

| **配方** | **实验室** | **电池壳型号** | **极片涂层厚度/μm** | **压实密度/g·cm-3** | **固含量/%** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| a | 1 | CR2430 | 40~42 | 3.00~3.04 | 40 |
| 3 | CR2430 | 41~69 | 3.07~3.19 | 50 |
| 4 | CR2430 | 38~39 | 2.96~3.00 | 43 |
| 5 | CR2032 | 37 | 3.00 | 48 |
| 6 | CR2032 | 36~50 | 2.97~3.04 | 49~51 |
| 7 | CR2025 | 35 | 3.00 | 39 |
| 8 | CR2032 | 56 | 2.93~3.04 | 35 |
| 9 | CR2032 | 34 | 3.02-3.12 | 43 |
| b | 1 | CR2430 | 39~45 | 2.98~3.05 | 40 |
| 2 | CR2430 | 35~36 | 2.96~3.10 | 30 |
| 3 | CR2430 | 42~46 | 3.07~3.11 | 58 |
| 4 | CR2430 | 42~44 | 2.97~3.06 | 48 |
| 5 | CR2032 | 47 | 3.00 | 55 |
| 6 | CR2032 | 43~50 | 2.92~3.00 | 53~55 |
| 7 | CR2025 | 37 | 3.00 | 43 |
| 8 | CR2032 | 61~65 | 2.97~3.00 | 47 |
| c | 1 | CR2430 | 50~68 | 2.95~3.12 | 40~66 |
| 2 | CR2430 | 55~60 | 3.05~3.09 | 50 |
| 3 | CR2430 | 42.3~96 | 3.08~3.17 | 60 |
| 4 | CR2430 | 49 | 2.96~3.06 | 57 |
| 5 | CR2032 | 54 | 3.00 | 65 |
| 6 | CR2032 | 50~51 | 2.90~2.97 | 72 |
| 7 | CR2025 | 36 | 3.00 | 50 |
| 8 | CR2032 | 56~65 | 2.92~2.97 | 55 |

表7 扣式全电池工艺参数验证表

| **配方** | **实验室** | **电池壳型号** | **CB值** | **正极片涂层厚度 /μm** | **正极片压实密度/g·cm-3** | **正极固含量/%** | **负极片涂层厚度/μm** | **负极片压实密度/g·cm-3** | **负极固含量**  **/%** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| A | 1 | CR2025 | 1.05~1.10 | 35~42 | 3.00~3.06 | 40 | 41~42 | 1.43~1.45 | 40 |
| 2 | CR2025 | 1.06~1.10 | 35~46 | 2.98~3.08 | 47 | 35~45 | 1.47~1.56 | 35 |
| 4 | CR2430 | 1.16~1.18 | 38~39 | 2.96~3.00 | 43 | 22 | 1.52 | 45 |
| 5 | CR2032 | 1.09~1.10 | 37~38 | 3.00 | 48 | 31 | 1.50 | 51 |
| 7 | CR2025 | 1.20 | 35~39 | 3.00 | 39~43 | 36 | 1.50 | 48 |
| B | 1 | CR2025 | 1.06~1.10 | 37~41 | 2.95~3.02 | 40 | 39~43 | 1.43~1.50 | 40 |
| 2 | CR2025 | 1.08~1.15 | 59~60 | 2.97~3.05 | 47 | 47 | 1.40~1.46 | 35 |
| 4 | CR2430 | 1.17~1.20 | 42~44 | 2.97~3.06 | 38~48 | 26 | 1.61 | 45 |
| 5 | CR2032 | 1.15~1.18 | 47~48 | 3.00 | 55 | 44 | 1.50 | 49 |
| 7 | CR2025 | 1.20 | 37 | 3.00 | 43 | 36 | 1.50 | 48 |
| C | 1 | CR2025 | 1.07~1.10 | 35~37 | 2.96~3.01 | 40 | 39~43 | 1.45~1.52 | 40 |
| 2 | CR2025 | 1.07~1.12 | 36~58 | 2.98~3.03 | 66 | 35~47 | 1.52~1.53 | 35 |
| 4 | CR2430 | 1.13~1.15 | 48~49 | 2.96~3.06 | 57 | 29 | 1.64 | 45 |
| 5 | CR2032 | 1.06~1.11 | 52~54 | 3.00 | 65 | 47 | 1.50 | 51 |
| 7 | CR2025 | 1.15~1.20 | 36~37 | 3.00 | 49~50 | 36 | 1.50 | 48 |
| D | 1 | CR2025 | 1.00~1.10 | 48~50 | 2.98~3.02 | 47 | 34~35 | 1.46~1.53 | 40 |
| 2 | CR2025 | 1.12 | 48~49 | 3.02~3.05 | 48~49 | 32~35 | 1.47~1.49 | 32~33 |
| 4 | CR2430 | 1.18~1.20 | 42~44 | 2.97~3.02 | 45~48 | 30 | 1.52 | 45 |
| 5 | CR2032 | 1.07~1.10 | 47~48 | 3.00 | 55 | 43 | 1.50 | 32 |
| 7 | CR2025 | 1.05 | 37~40 | 3.00 | 42~43 | 31 | 1.50 | 40 |
| E | 1 | CR2025 | 1.00~1.12 | 48~50 | 2.97~3.01 | 47 | 35 | 1.46~1.51 | 45 |
| 2 | CR2025 | 1.00~1.12 | 48~49 | 3.02~3.04 | 47~48 | 32~33 | 1.45~1.49 | 32~45 |
| 4 | CR2430 | 1.16~1.18 | 42~58 | 2.97~3.06 | 48 | 27~37 | 1.50 | 47 |
| 5 | CR2032 | 1.14~1.17 | 47~48 | 3.00 | 55 | 42~43 | 1.50 | 32 |
| 7 | CR2025 | 1.05 | 37~39 | 3.00 | 43 | 35 | 1.50 | 55 |

**3.3.5 扣式半电池测试方法试验数据**

为验证测试方法的重复性和再现性，对I、II和III样分别进行了不同正极配比下扣式半电池性能的试验，镍锰酸锂正极材料的扣式半电池首次充电比容量（C）、首次放电比容量（Cm）、首次充放电效率（η）试验数据见表8~表10：

表8 扣式半电池性能试验数据（样品I）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.6 | 148.6 | 148.6 | 147.9 | 147.1 | 147.1 | 147.3 | 147.6 | 0.52 |
| Cm（mA. h/g） | 134.5 | 133.6 | 133.4 | 135.6 | 134.1 | 134.5 | 134.4 | 134.3 | 0.59 |
| η（%） | 91.7 | 89.9 | 89.8 | 91.7 | 91.2 | 91.4 | 91.2 | 91.0 | 0.97 |
| 3 | C（mA. h/g） | 152.1 | 152.8 | 152.1 | 153.4 | 157.8 | 152.9 | 152.7 | 153.4 | 1.30 |
| Cm（mA. h/g） | 130.6 | 130.1 | 129.4 | 129.6 | 130.8 | 129.6 | 130.2 | 130.0 | 0.41 |
| η（%） | 85.9 | 85.1 | 85.1 | 84.5 | 82.9 | 84.8 | 85.3 | 84.8 | 1.11 |
| 4 | C（mA. h/g） | 150.3 | 148.2 | 149.4 | 150.5 | 150.7 | 147.8 | 148.7 | 149.4 | 0.78 |
| Cm（mA. h/g） | 131.9 | 132.6 | 133.2 | 132.8 | 133.7 | 131.4 | 132.8 | 132.6 | 0.58 |
| η（%） | 87.8 | 89.5 | 89.2 | 88.2 | 88.7 | 88.9 | 89.3 | 88.8 | 0.69 |
| 5 | C（mA. h/g） | 145.7 | 147.4 | 147.3 | 147.7 | 145.5 | 147.2 | 147.2 | 146.9 | 0.60 |
| Cm（mA. h/g） | 135.8 | 137.4 | 136.8 | 137.1 | 134.4 | 137.0 | 134.8 | 136.2 | 0.88 |
| η（%） | 93.2 | 93.2 | 92.9 | 92.8 | 92.4 | 93.1 | 91.6 | 92.7 | 0.62 |
| 6 | C（mA. h/g） | 145.3 | 145.2 | 143.9 | 146.2 | 145.4 | 144.1 | 145.7 | 145.1 | 0.57 |
| Cm（mA. h/g） | 131.7 | 130.0 | 129.8 | 131.2 | 131.2 | 131.3 | 130.8 | 130.9 | 0.54 |
| η（%） | 90.7 | 89.5 | 90.2 | 89.8 | 90.3 | 91.2 | 89.8 | 90.2 | 0.63 |
| 8 | C（mA. h/g） | 145.6 | 146.2 | 147.3 | 146.2 | 146.4 | 147.7 | 146.5 | 146.6 | 0.49 |
| Cm（mA. h/g） | 134.2 | 134.4 | 133.9 | 134.5 | 134.4 | 134.6 | 134.3 | 134.3 | 0.17 |
| η（%） | 92.2 | 91.9 | 90.9 | 92.0 | 91.8 | 91.1 | 91.7 | 91.7 | 0.35 |
| 样品编号 | I-b | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.3 | 145.7 | 144.9 | 145.4 | 145.8 | 144.3 | 145.2 | 145.4 | 0.45 |
| Cm（mA. h/g） | 133.0 | 133.6 | 133.0 | 133.4 | 132.3 | 130.2 | 133.0 | 132.6 | 0.87 |
| η（%） | 90.9 | 91.7 | 91.8 | 91.7 | 90.7 | 90.2 | 91.6 | 91.2 | 0.67 |
| 2 | C（mA. h/g） | 144.9 | 143.6 | 145.2 | 144.3 | 144.6 | 143.8 | 144.6 | 144.4 | 0.40 |
| Cm（mA. h/g） | 132.4 | 130.8 | 133.2 | 132.7 | 132.4 | 132.0 | 132.8 | 132.3 | 0.58 |
| η（%） | 91.4 | 91.1 | 91.7 | 92.0 | 91.6 | 91.8 | 91.8 | 91.6 | 0.33 |
| 4 | C（mA. h/g） | 148.0 | 146.0 | 146.2 | 146.5 | 147.3 | 146.7 | 148.1 | 147.0 | 0.57 |
| Cm（mA. h/g） | 133.6 | 133.7 | 134.3 | 132.9 | 133.8 | 132.7 | 134.8 | 133.7 | 0.55 |
| η（%） | 90.3 | 91.6 | 91.9 | 90.7 | 90.8 | 90.5 | 91.0 | 91.0 | 0.63 |
| 5 | C（mA. h/g） | 147.8 | 146.9 | 146.2 | 147.4 | 143.7 | 144.9 | 146.4 | 146.2 | 0.99 |
| Cm（mA. h/g） | 136.5 | 136.3 | 136.3 | 136.8 | 134.7 | 135.7 | 136.7 | 136.1 | 0.54 |
| η（%） | 92.3 | 92.8 | 93.2 | 92.8 | 93.7 | 93.7 | 93.4 | 93.1 | 0.56 |
| 8 | C（mA. h/g） | 144.9 | 145.4 | 145.6 | 144.9 | 145.6 | 145.8 | 144.9 | 145.3 | 0.27 |
| Cm（mA. h/g） | 131.4 | 132.8 | 131.2 | 132.3 | 131.8 | 132.7 | 132.3 | 132.1 | 0.47 |
| η（%） | 90.7 | 91.3 | 90.1 | 91.3 | 90.5 | 91.0 | 91.3 | 90.9 | 0.52 |
| 样品编号 | I-c | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 143.5 | 143.6 | 143.7 | 144.2 | 142.4 | 144.1 | 143.9 | 143.6 | 0.42 |
| Cm（mA. h/g） | 131.2 | 130.2 | 131.7 | 132.3 | 129.8 | 131.9 | 132.0 | 131.3 | 0.73 |
| η（%） | 91.4 | 90.7 | 91.6 | 91.7 | 91.2 | 91.5 | 91.7 | 91.4 | 0.43 |
| 2 | C（mA. h/g） | 147.6 | 145.9 | 147.4 | 146.9 | 147.7 | 147.3 | 147.4 | 147.2 | 0.41 |
| Cm（mA. h/g） | 133.9 | 132.2 | 134.0 | 133.7 | 133.2 | 133.3 | 133.8 | 133.4 | 0.47 |
| η（%） | 90.7 | 90.6 | 90.9 | 91.0 | 90.2 | 90.5 | 90.8 | 90.7 | 0.30 |
| 4 | C（mA. h/g） | 146.1 | 146.1 | 146 | 146.5 | 145.8 | 146.7 | 145.8 | 146.1 | 0.23 |
| Cm（mA. h/g） | 133.5 | 133.1 | 132.8 | 133.4 | 133.8 | 134.6 | 132.5 | 133.4 | 0.52 |
| η（%） | 91.4 | 91.1 | 91.0 | 91.1 | 91.8 | 91.8 | 90.9 | 91.3 | 0.40 |
| 5 | C（mA. h/g） | 143.9 | 144.9 | 144.0 | 146.2 | 143.6 | 146.5 | 144.4 | 144.8 | 0.79 |
| Cm（mA. h/g） | 133.6 | 134.3 | 133.4 | 133.8 | 132.6 | 134.4 | 133.4 | 133.6 | 0.46 |
| η（%） | 92.9 | 92.7 | 92.6 | 91.5 | 92.3 | 91.8 | 92.4 | 92.3 | 0.54 |
| 8 | C（mA. h/g） | 144.4 | 144.9 | 145.4 | 144.2 | 144.4 | 145.2 | 144.9 | 144.8 | 0.31 |
| Cm（mA. h/g） | 132.8 | 131.6 | 131.9 | 132.7 | 133 | 132.4 | 132.2 | 132.4 | 0.38 |
| η（%） | 92.0 | 90.8 | 90.7 | 92.0 | 92.1 | 91.2 | 91.2 | 91.4 | 0.64 |

表9 扣式半电池性能试验数据（样品II）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-a | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 150.8 | 150.9 | 150.2 | 150.9 | 150.4 | 150.5 | 149.7 | 150.5 | 0.29 |
| Cm（mA. h/g） | 133.9 | 133.9 | 133.1 | 133.6 | 133.6 | 133.4 | 132.8 | 133.5 | 0.30 |
| η（%） | 88.8 | 88.7 | 88.6 | 88.5 | 88.8 | 88.6 | 88.7 | 88.7 | 0.12 |
| 3 | C（mA. h/g） | 152.3 | 157.4 | 157.8 | 157.8 | 158.4 | 147.0 | 157.5 | 155.5 | 2.74 |
| Cm（mA. h/g） | 129.0 | 128.5 | 128.8 | 128.9 | 128.6 | 119.9 | 129.0 | 127.5 | 2.64 |
| η（%） | 84.7 | 81.6 | 81.6 | 81.7 | 81.2 | 81.6 | 81.9 | 82.0 | 1.45 |
| 4 | C（mA. h/g） | 153.5 | 152.3 | 153.8 | 153.2 | 153.6 | 154.8 | 153.7 | 153.6 | 0.49 |
| Cm（mA. h/g） | 129.8 | 130.0 | 130.6 | 130.1 | 130.4 | 132.2 | 130.7 | 130.5 | 0.61 |
| η（%） | 84.6 | 85.4 | 84.9 | 84.9 | 84.9 | 84.4 | 85.0 | 84.9 | 0.37 |
| 6 | C（mA. h/g） | 149.8 | 150.8 | 151.7 | 151.6 | 150.2 | 151.2 | 151.4 | 151 | 0.48 |
| Cm（mA. h/g） | 133.2 | 133.3 | 132.4 | 133.4 | 133 | 131.8 | 133 | 132.9 | 0.43 |
| η（%） | 88.95 | 88.41 | 87.3 | 88.03 | 88.58 | 87.17 | 87.85 | 88.04 | 0.75 |
| 8 | C（mA. h/g） | 149.3 | 149.8 | 149.4 | 150.7 | 150.3 | 149.9 | 150.3 | 150.0 | 0.34 |
| Cm（mA. h/g） | 131.9 | 131.4 | 133.0 | 132.7 | 132.3 | 131.3 | 131.6 | 132.0 | 0.50 |
| η（%） | 88.3 | 87.7 | 89.0 | 88.1 | 88.0 | 87.6 | 87.6 | 88.0 | 0.59 |
| 样品编号 | II-b | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.1 | 149.1 | 147.2 | 149.3 | 147.0 | 147.6 | 147.3 | 147.7 | 0.72 |
| Cm（mA. h/g） | 130.5 | 133.6 | 131.7 | 133.4 | 131.7 | 132.8 | 131.6 | 132.2 | 0.78 |
| η（%） | 89.3 | 89.6 | 89.5 | 89.4 | 89.6 | 90.0 | 89.3 | 89.5 | 0.24 |
| 2 | C（mA. h/g） | 146.4 | 145.0 | 147.2 | 147.4 | 148.7 | 146.0 | 147.8 | 146.9 | 0.77 |
| Cm（mA. h/g） | 131.3 | 130.2 | 132.8 | 132.5 | 133.2 | 130.8 | 132.1 | 131.8 | 0.78 |
| η（%） | 89.7 | 89.8 | 90.2 | 89.9 | 89.6 | 89.6 | 89.4 | 89.7 | 0.27 |
| 4 | C（mA. h/g） | 150.5 | 150.7 | 151.3 | 151.4 | 150.9 | 151.4 | 150.0 | 150.9 | 0.35 |
| Cm（mA. h/g） | 131.1 | 131.3 | 130.9 | 131.6 | 131.5 | 131.1 | 130.8 | 131.2 | 0.23 |
| η（%） | 87.1 | 87.1 | 86.5 | 86.9 | 87.1 | 86.6 | 87.2 | 86.9 | 0.32 |
| 6 | C（mA. h/g） | 144.7 | 146.0 | 144.9 | 143.5 | 144.8 | 146.3 | 146.6 | 145.3 | 0.75 |
| Cm（mA. h/g） | 130.1 | 130.8 | 129.8 | 129.9 | 130.4 | 130.3 | 129.5 | 130.1 | 0.33 |
| η（%） | 89.9 | 89.6 | 89.6 | 90.5 | 90.0 | 89.1 | 88.3 | 89.6 | 0.78 |
| 8 | C（mA. h/g） | 147.8 | 147.9 | 146.4 | 147.2 | 146.4 | 147.4 | 146.6 | 147.1 | 0.40 |
| Cm（mA. h/g） | 131.9 | 132.2 | 131.8 | 131.8 | 130.5 | 132.1 | 131.9 | 131.7 | 0.40 |
| η（%） | 89.2 | 89.4 | 90.0 | 89.5 | 89.1 | 89.6 | 90.0 | 89.6 | 0.35 |
| 样品编号 | II-c | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 151.1 | 149.1 | 149.4 | 149.7 | 151.2 | 149.3 | 150.8 | 150.1 | 0.61 |
| Cm（mA. h/g） | 132.9 | 131.9 | 132.3 | 133.0 | 132.7 | 132.6 | 132.9 | 132.6 | 0.30 |
| η（%） | 88.0 | 88.5 | 88.6 | 88.8 | 87.8 | 88.8 | 88.1 | 88.4 | 0.48 |
| 2 | C（mA. h/g） | 150.0 | 148.8 | 151.0 | 152.5 | 149.1 | 148.5 | 150.1 | 150.0 | 0.94 |
| Cm（mA. h/g） | 131.8 | 131.6 | 132.0 | 131.1 | 131.6 | 131.5 | 131.9 | 131.6 | 0.23 |
| η（%） | 87.8 | 88.5 | 87.4 | 86.0 | 88.3 | 88.6 | 87.8 | 87.8 | 1.01 |
| 4 | C（mA. h/g） | 151.4 | 150.1 | 152.0 | 150.8 | 152.1 | 151.7 | 150.6 | 151.2 | 0.50 |
| Cm（mA. h/g） | 130.9 | 130.7 | 132.0 | 130.5 | 131.8 | 131.5 | 130.3 | 131.1 | 0.51 |
| η（%） | 86.5 | 87.1 | 86.8 | 86.5 | 86.7 | 86.7 | 86.5 | 86.7 | 0.25 |
| 6 | C（mA. h/g） | 151.7 | 152.4 | 150.8 | 151.8 | 151.8 | 153.3 | 151.8 | 151.9 | 0.50 |
| Cm（mA. h/g） | 131 | 131.8 | 130.3 | 131.9 | 130.7 | 131.7 | 130.4 | 131.1 | 0.52 |
| η（%） | 86.34 | 86.48 | 86.39 | 86.91 | 86.09 | 85.87 | 85.87 | 86.28 | 0.43 |
| 8 | C（mA. h/g） | 148.5 | 149.2 | 149.0 | 148.9 | 149.5 | 149.5 | 150.2 | 149.3 | 0.36 |
| Cm（mA. h/g） | 132.7 | 131.6 | 131.5 | 132.2 | 132.4 | 132.9 | 132.4 | 132.2 | 0.40 |
| η（%） | 89.4 | 88.2 | 88.3 | 88.8 | 88.6 | 88.9 | 88.1 | 88.6 | 0.50 |

表10 扣式半电池性能试验数据（样品III）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | III-a | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 155.8 | 155.6 | 156.9 | 155.3 | 155.0 | 155.8 | 154.2 | 155.5 | 0.53 |
| Cm（mA. h/g） | 133.9 | 133.7 | 135.4 | 134.3 | 134.5 | 133.9 | 133.6 | 134.2 | 0.46 |
| η（%） | 85.9 | 85.9 | 86.3 | 86.5 | 86.8 | 86.0 | 86.6 | 86.3 | 0.41 |
| 4 | C（mA. h/g） | 157.2 | 156.9 | 157.5 | 156.6 | 157.8 | 157.4 | 156.4 | 157.1 | 0.32 |
| Cm（mA. h/g） | 134.5 | 134.5 | 135.8 | 134.5 | 135.2 | 135.6 | 133.9 | 134.9 | 0.51 |
| η（%） | 85.6 | 85.7 | 86.2 | 85.9 | 85.7 | 86.2 | 85.6 | 85.8 | 0.31 |
| 6 | C（mA. h/g） | 156.2 | 155.5 | 156.3 | 157.1 | 155.5 | 156.4 | 157 | 156.3 | 0.41 |
| Cm（mA. h/g） | 142 | 140.6 | 141.1 | 142.2 | 140.1 | 141.1 | 141.3 | 141.2 | 0.52 |
| η（%） | 90.9 | 90.41 | 90.26 | 90.53 | 90.1 | 90.25 | 89.96 | 90.34 | 0.34 |
| 7 | C（mA. h/g） | 159.6 | 155.1 | 152.5 | 146.0 | 143.5 | 152.3 | 157.4 | 152.3 | 3.83 |
| Cm（mA. h/g） | 136.9 | 131.9 | 128.8 | 124.0 | 119.3 | 130.2 | 133.3 | 129.2 | 4.58 |
| η（%） | 85.8 | 85.0 | 84.4 | 85.0 | 83.1 | 85.5 | 84.7 | 84.8 | 1.03 |
| 8 | C（mA. h/g） | 154.4 | 153.1 | 153.7 | 154.3 | 153.9 | 153.7 | 154.8 | 154.0 | 0.36 |
| Cm（mA. h/g） | 132.1 | 132.7 | 132.3 | 131.8 | 133.1 | 133.2 | 132.7 | 132.6 | 0.39 |
| η（%） | 85.6 | 86.7 | 86.1 | 85.4 | 86.5 | 86.7 | 85.7 | 86.1 | 0.62 |
| 12 | C（mA. h/g） | 153.3 | 155.4 | 155.7 | 158.3 | 158.2 | 157.4 | 155.3 | 156.2 | 0.75 |
| Cm（mA. h/g） | 130.6 | 132 | 132.5 | 136.7 | 135.9 | 133.9 | 133.5 | 133.6 | 1.21 |
| η（%） | 85.2 | 84.9 | 85.1 | 86.4 | 85.9 | 85.1 | 86 | 85.5 | 0.77 |
| 样品编号 | III-b | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 152.6 | 153.6 | 151.4 | 152.4 | 152.9 | 151.3 | 151.3 | 152.2 | 0.59 |
| Cm（mA. h/g） | 133.7 | 134.8 | 132.7 | 133.2 | 133.8 | 132.6 | 133.8 | 133.5 | 0.57 |
| η（%） | 87.6 | 87.8 | 87.7 | 87.4 | 87.5 | 87.6 | 88.4 | 87.7 | 0.38 |
| 2 | C（mA. h/g） | 152.9 | 151.3 | 152.4 | 152.3 | 152.1 | 152.5 | 151.9 | 152.2 | 0.34 |
| Cm（mA. h/g） | 133.6 | 132.8 | 133.5 | 133.7 | 133.1 | 133.3 | 133.5 | 133.4 | 0.24 |
| η（%） | 87.4 | 87.8 | 87.6 | 87.8 | 87.5 | 87.4 | 87.9 | 87.6 | 0.23 |
| 4 | C（mA. h/g） | 155.6 | 155.7 | 157.0 | 155.2 | 156.9 | 157.3 | 155.8 | 156.2 | 0.53 |
| Cm（mA. h/g） | 136.2 | 136.0 | 136.2 | 135.5 | 136.7 | 137.7 | 135.6 | 136.3 | 0.55 |
| η（%） | 87.5 | 87.4 | 86.8 | 87.3 | 87.1 | 87.5 | 87.0 | 87.2 | 0.33 |
| 6 | C（mA. h/g） | 150 | 149.5 | 151.5 | 150.1 | 152.3 | 151.3 | 153.7 | 151.2 | 0.98 |
| Cm（mA. h/g） | 130 | 129.2 | 129.8 | 129.3 | 130.6 | 129.7 | 130.7 | 129.9 | 0.45 |
| η（%） | 86.7 | 86.42 | 85.7 | 86.1 | 85.72 | 85.69 | 85.01 | 85.91 | 0.65 |
| 8 | C（mA. h/g） | 149.2 | 150.4 | 149.3 | 150.4 | 149.8 | 151.4 | 150.0 | 150.1 | 0.51 |
| Cm（mA. h/g） | 132.2 | 132.4 | 132.6 | 132.1 | 132.4 | 132.5 | 132.7 | 132.4 | 0.16 |
| η（%） | 88.6 | 88.0 | 88.8 | 87.8 | 88.4 | 87.5 | 88.5 | 88.2 | 0.53 |
| 样品编号 | III-c | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 156.1 | 156.8 | 156.7 | 157.1 | 156.5 | 156.2 | 155.8 | 156.5 | 0.29 |
| Cm（mA. h/g） | 135.7 | 135.4 | 134.9 | 135.2 | 135.6 | 135.3 | 134.6 | 135.2 | 0.29 |
| η（%） | 86.9 | 86.4 | 86.1 | 86.1 | 86.6 | 86.6 | 86.4 | 86.4 | 0.36 |
| 2 | C（mA. h/g） | 154.8 | 154.6 | 154.7 | 154.7 | 155.4 | 155.0 | 154.5 | 154.8 | 0.20 |
| Cm（mA. h/g） | 133.9 | 134.2 | 133.5 | 134.6 | 134.6 | 134.4 | 134.1 | 134.2 | 0.30 |
| η（%） | 86.5 | 86.8 | 86.3 | 87.0 | 86.6 | 86.7 | 86.8 | 86.7 | 0.26 |
| 3 | C（mA. h/g） | 156.2 | 155.4 | 154.9 | 154.8 | 155.8 | 155.4 | 155.7 | 155.5 | 0.32 |
| Cm（mA. h/g） | 134.0 | 134.5 | 134.4 | 134.4 | 133.6 | 133.4 | 134.6 | 134.1 | 0.35 |
| η（%） | 85.8 | 86.6 | 86.8 | 86.8 | 85.8 | 85.8 | 86.4 | 86.3 | 0.55 |
| 4 | C（mA. h/g） | 155.3 | 156.3 | 156.2 | 156.8 | 155.4 | 154.9 | 155.9 | 155.8 | 0.43 |
| Cm（mA. h/g） | 135.5 | 135.7 | 135.7 | 137.2 | 136.0 | 134.8 | 135.7 | 135.8 | 0.53 |
| η（%） | 87.3 | 86.8 | 86.9 | 87.5 | 87.5 | 87.0 | 87.0 | 87.1 | 0.32 |
| 6 | C（mA. h/g） | 155.9 | 155.1 | 154.8 | 155.6 | 152.2 | 154.0 | 153.9 | 154.5 | 0.82 |
| Cm（mA. h/g） | 135.7 | 135.0 | 135.2 | 133.6 | 133.0 | 135.1 | 133.7 | 134.5 | 0.76 |
| η（%） | 87.1 | 87.0 | 87.3 | 85.8 | 87.4 | 87.7 | 86.9 | 87.0 | 0.69 |
| 7 | C（mA. h/g） | 150.3 | 152.3 | 147.4 | 154.6 | 152.6 | 160.3 | 150.0 | 151.2 | 1.66 |
| Cm（mA. h/g） | 130.2 | 122.3 | 130.4 | 131.7 | 133.5 | 133.3 | 121.8 | 128.3 | 3.89 |
| η（%） | 86.6 | 80.3 | 88.4 | 85.2 | 87.5 | 83.2 | 81.3 | 84.9 | 3.96 |
| 8 | C（mA. h/g） | 156.9 | 156.4 | 156.4 | 155.4 | 156.7 | 157.2 | 155.9 | 157.1 | 0.39 |
| Cm（mA. h/g） | 135.1 | 135.3 | 134.8 | 135.0 | 135.8 | 135.6 | 134.9 | 135.2 | 0.27 |
| η（%） | 86.1 | 86.5 | 86.2 | 86.9 | 86.7 | 86.3 | 86.5 | 86.4 | 0.32 |

**3.3.6 扣式全电池测试方法试验数据**

为验证测试方法的重复性和再现性，进行了不同正极和负极配比下扣式全电池性能的试验，镍锰酸锂正极材料的扣式全电池首次充电比容量、首次放电比容量、首次充放电效率试验数据见表11~表15：

表11 扣式全电池性能试验数据（样品I）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 144.1 | 144.1 | 146.0 | 145.6 | 144.9 | 142.4 | 143.7 | 144.4 | 0.84 |
| Cm（mA. h/g） | 122.5 | 123.8 | 124.4 | 123.2 | 124.8 | 121.8 | 123.6 | 123.4 | 0.85 |
| η（%） | 85.0 | 85.9 | 85.2 | 84.6 | 86.1 | 85.5 | 86.0 | 85.5 | 0.66 |
| 2 | C（mA. h/g） | 141.7 | 142.7 | 142.1 | 141.5 | 140.8 | 140.5 | 141.9 | 141.6 | 0.54 |
| Cm（mA. h/g） | 122.3 | 123.6 | 122.7 | 122.5 | 121.1 | 122.9 | 123.8 | 122.7 | 0.73 |
| η（%） | 86.3 | 86.6 | 86.4 | 86.6 | 86.0 | 86.4 | 87.2 | 86.5 | 0.44 |
| 4 | C（mA. h/g） | 141.4 | 142.8 | 142.4 | 142.9 | 141.3 | 142.0 | 141.0 | 142.0 | 0.53 |
| Cm（mA. h/g） | 120.1 | 122.4 | 121.1 | 121.9 | 120.8 | 121.7 | 120.8 | 121.3 | 0.65 |
| η（%） | 84.9 | 85.7 | 85.0 | 85.3 | 85.5 | 85.7 | 85.7 | 85.4 | 0.38 |
| 5 | C（mA. h/g） | 143.1 | 143.7 | 144.4 | 148.9 | 145.7 | 145.9 | 164.0 | 145.3 | 1.43 |
| Cm（mA. h/g） | 128.0 | 128.0 | 127.0 | 123.4 | 127.9 | 127.3 | 126.5 | 126.9 | 1.40 |
| η（%） | 89.5 | 89.1 | 87.9 | 82.9 | 87.8 | 87.3 | 77.1 | 87.4 | 2.71 |
| 样品编号 | I-B | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 142.7 | 142.2 | 142.9 | 144.0 | 143.9 | 143.7 | 143.3 | 143.2 | 0.47 |
| Cm（mA. h/g） | 126.3 | 124.9 | 124.8 | 128.0 | 127.1 | 127.1 | 126.4 | 126.4 | 0.93 |
| η（%） | 88.5 | 87.8 | 87.3 | 88.9 | 88.3 | 88.4 | 88.2 | 88.2 | 0.57 |
| 2 | C（mA. h/g） | 144.4 | 145.1 | 143.0 | 144.9 | 145.3 | 145.1 | 145.0 | 144.7 | 0.55 |
| Cm（mA. h/g） | 126.9 | 127.5 | 126.0 | 126.1 | 126.3 | 125.5 | 126.9 | 126.5 | 0.54 |
| η（%） | 87.9 | 87.9 | 88.1 | 87.0 | 86.9 | 86.5 | 87.5 | 87.4 | 0.70 |
| 4 | C（mA. h/g） | 156.8 | 155.2 | 156.7 | 156.2 | 155.1 | 156.4 | 154.2 | 155.8 | 0.63 |
| Cm（mA. h/g） | 133.3 | 132.2 | 133.9 | 132.6 | 132.0 | 133.5 | 131.0 | 132.6 | 0.76 |
| η（%） | 85.0 | 85.2 | 85.5 | 84.9 | 85.1 | 85.4 | 85.0 | 85.1 | 0.25 |
| 5 | C（mA. h/g） | 142.3 | 143.1 | 143.4 | 142.9 | 144.2 | 142.7 | 142.0 | 142.9 | 0.51 |
| Cm（mA. h/g） | 126.5 | 127.4 | 126.8 | 126.4 | 126.6 | 126.0 | 126.5 | 126.6 | 0.34 |
| η（%） | 88.9 | 89.0 | 88.5 | 88.5 | 87.8 | 88.3 | 89.0 | 88.6 | 0.50 |
| 样品编号 | I-C | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.2 | 146.6 | 146.5 | 146.0 | 146.0 | 146.3 | 146.4 | 146.3 | 0.17 |
| Cm（mA. h/g） | 122.4 | 122.6 | 122.4 | 122.2 | 122.8 | 122.3 | 122.5 | 122.5 | 0.16 |
| η（%） | 83.7 | 83.6 | 83.5 | 83.7 | 84.1 | 83.6 | 83.7 | 83.7 | 0.22 |
| 2 | C（mA. h/g） | 145.4 | 145.0 | 145.8 | 145.8 | 146.1 | 144.8 | 144.1 | 145.3 | 0.48 |
| Cm（mA. h/g） | 121.7 | 122.1 | 122.3 | 122.8 | 122.6 | 122.1 | 121.8 | 122.2 | 0.33 |
| η（%） | 83.7 | 84.2 | 83.9 | 84.2 | 83.9 | 84.3 | 84.5 | 84.1 | 0.33 |
| 4 | C（mA. h/g） | 143.3 | 143.7 | 142.9 | 143.1 | 143.3 | 143.6 | 143.3 | 143.3 | 0.19 |
| Cm（mA. h/g） | 120.3 | 120.4 | 120.3 | 120.5 | 120.4 | 119.9 | 120.1 | 120.3 | 0.17 |
| η（%） | 84.0 | 83.8 | 84.2 | 84.2 | 84.0 | 83.5 | 83.8 | 83.9 | 0.30 |
| 样品编号 | I-D | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 143.1 | 143.5 | 140.0 | 144.3 | 143.7 | 142.9 | 143.5 | 143.0 | 0.98 |
| Cm（mA. h/g） | 123.3 | 123.1 | 121.2 | 122.6 | 122.0 | 121.8 | 123.5 | 122.5 | 0.70 |
| η（%） | 86.2 | 85.8 | 86.6 | 85.0 | 84.9 | 85.2 | 86.1 | 85.7 | 0.75 |
| 2 | C（mA. h/g） | 143.5 | 143.0 | 145.8 | 145.3 | 143.6 | 144.2 | 142.2 | 144.0 | 0.87 |
| Cm（mA. h/g） | 121.8 | 121.9 | 122.3 | 122.6 | 122.0 | 121.8 | 122.5 | 122.1 | 0.27 |
| η（%） | 84.9 | 85.3 | 83.9 | 84.4 | 85.0 | 84.5 | 86.1 | 84.8 | 0.85 |
| 4 | C（mA. h/g） | 146.1 | 145.4 | 145.6 | 145.8 | 144.0 | 144.8 | 147.0 | 145.5 | 0.66 |
| Cm（mA. h/g） | 122.4 | 121.5 | 121.8 | 121.8 | 120.8 | 121.1 | 123.5 | 121.8 | 0.74 |
| η（%） | 83.8 | 83.5 | 83.7 | 83.5 | 83.9 | 83.6 | 84.0 | 83.7 | 0.21 |
| 5 | C（mA. h/g） | 143.7 | 142.8 | 142.5 | 142.9 | 143.8 | 143.0 | 142.6 | 143.0 | 0.36 |
| Cm（mA. h/g） | 126.6 | 126.8 | 126.5 | 125.8 | 126.7 | 127.0 | 127.2 | 126.7 | 0.35 |
| η（%） | 88.1 | 88.8 | 88.8 | 88.0 | 88.1 | 88.9 | 89.2 | 88.6 | 0.54 |
| 样品编号 | I-E | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 140.5 | 140.8 | 142.2 | 142.6 | 142.1 | 141.7 | 141.3 | 141.6 | 0.54 |
| Cm（mA. h/g） | 125.7 | 126.2 | 127.8 | 127.4 | 125.9 | 126.3 | 125.8 | 126.4 | 0.65 |
| η（%） | 89.5 | 89.6 | 89.9 | 89.3 | 88.6 | 89.1 | 89.0 | 89.3 | 0.47 |
| 2 | C（mA. h/g） | 140.9 | 141.5 | 140.5 | 140.5 | 140.1 | 141.3 | 142.0 | 141.0 | 0.47 |
| Cm（mA. h/g） | 124.7 | 126.5 | 126.4 | 126.1 | 127.2 | 125.3 | 126.2 | 126.1 | 0.65 |
| η（%） | 88.5 | 89.4 | 90.0 | 89.7 | 90.8 | 88.7 | 88.9 | 89.4 | 0.91 |
| 4 | C（mA. h/g） | 140.0 | 142.1 | 141.7 | 142.5 | 141.8 | 142.1 | 140.5 | 141.5 | 0.65 |
| Cm（mA. h/g） | 122.2 | 123.2 | 123.3 | 124.2 | 123.1 | 123.5 | 122.0 | 123.1 | 0.61 |
| η（%） | 87.3 | 86.7 | 87.0 | 87.2 | 86.8 | 86.9 | 86.8 | 87.0 | 0.23 |
| 5 | C（mA. h/g） | 140.4 | 140.7 | 142.1 | 141.3 | 141.3 | 141.5 | 141.1 | 141.2 | 0.39 |
| Cm（mA. h/g） | 125.7 | 125.2 | 126.5 | 126.7 | 128.0 | 125.3 | 126.8 | 126.3 | 0.79 |
| η（%） | 89.5 | 89.0 | 89.0 | 89.7 | 90.6 | 88.6 | 89.9 | 89.5 | 0.75 |

表12 扣式全电池性能试验数据（样品II）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-A | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.3 | 147.8 | 146.8 | 148.1 | 147.7 | 149.2 | 147.5 | 147.6 | 0.64 |
| Cm（mA. h/g） | 124.3 | 123.9 | 124.1 | 124.3 | 124.4 | 123.8 | 124.2 | 124.1 | 0.18 |
| η（%） | 85.0 | 83.8 | 84.5 | 83.9 | 84.2 | 83.0 | 84.2 | 84.1 | 0.75 |
| 2 | C（mA. h/g） | 147.4 | 147.6 | 143.6 | 145.6 | 146.8 | 146.5 | 146.0 | 146.2 | 0.92 |
| Cm（mA. h/g） | 123.7 | 123.8 | 122.2 | 123.5 | 123.9 | 124.2 | 123.8 | 123.6 | 0.52 |
| η（%） | 83.9 | 83.9 | 85.1 | 84.8 | 84.4 | 84.8 | 84.8 | 84.5 | 0.56 |
| 4 | C（mA. h/g） | 143.7 | 145.7 | 143.4 | 145.1 | 144.5 | 145.1 | 146.0 | 144.8 | 0.67 |
| Cm（mA. h/g） | 121.9 | 122.9 | 121.4 | 123.0 | 122.0 | 122.7 | 124.2 | 122.6 | 0.75 |
| η（%） | 84.8 | 84.4 | 84.7 | 84.8 | 84.4 | 84.6 | 85.1 | 84.7 | 0.29 |
| 5 | C（mA. h/g） | 142.2 | 142.9 | 143.8 | 143.4 | 142.9 | 144.1 | 143.1 | 143.2 | 0.44 |
| Cm（mA. h/g） | 128.5 | 128.0 | 128.8 | 128.9 | 129.0 | 130.5 | 129.0 | 129.0 | 0.60 |
| η（%） | 90.3 | 89.6 | 89.6 | 89.9 | 90.3 | 90.5 | 90.1 | 90.0 | 0.39 |
| 样品编号 | II-B | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 146.2 | 146.7 | 146.6 | 146.3 | 144.7 | 146.1 | 145.8 | 146.1 | 0.46 |
| Cm（mA. h/g） | 126.6 | 126.2 | 126.4 | 125.4 | 126.6 | 127.6 | 127.1 | 126.6 | 0.54 |
| η（%） | 86.6 | 86.0 | 86.2 | 85.7 | 87.5 | 87.3 | 87.2 | 86.6 | 0.80 |
| 2 | C（mA. h/g） | 149.5 | 147.5 | 149.8 | 150.3 | 147.9 | 149.2 | 148.0 | 148.9 | 0.72 |
| Cm（mA. h/g） | 128.1 | 127.0 | 128.8 | 128.5 | 127.1 | 128.8 | 127.5 | 128.0 | 0.60 |
| η（%） | 85.7 | 86.1 | 86.0 | 85.5 | 85.9 | 86.3 | 86.2 | 86.0 | 0.33 |
| 4 | C（mA. h/g） | 158.2 | 156.5 | 158.1 | 158.3 | 157.6 | 157.4 | 158.2 | 157.8 | 0.41 |
| Cm（mA. h/g） | 134.8 | 133.6 | 134.4 | 133.9 | 133.6 | 134.2 | 134.5 | 134.1 | 0.34 |
| η（%） | 85.2 | 85.4 | 85.0 | 84.6 | 84.8 | 85.3 | 85.0 | 85.0 | 0.32 |
| 5 | C（mA. h/g） | 142.7 | 142.9 | 143.3 | 143.1 | 143.0 | 143.3 | 142.1 | 142.9 | 0.29 |
| Cm（mA. h/g） | 129.6 | 129.1 | 129.6 | 129.5 | 128.4 | 129.5 | 128.6 | 129.2 | 0.39 |
| η（%） | 90.8 | 90.3 | 90.5 | 90.5 | 89.8 | 90.4 | 90.5 | 90.4 | 0.34 |
| 样品编号 | II-C | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 149.6 | 148.1 | 148.2 | 149.4 | 147.6 | 148.5 | 147.8 | 148.5 | 0.52 |
| Cm（mA. h/g） | 127.7 | 129.1 | 126.9 | 129.8 | 128.2 | 126.4 | 127.6 | 128.0 | 0.94 |
| η（%） | 85.4 | 87.2 | 85.6 | 86.9 | 86.9 | 85.1 | 86.3 | 86.2 | 0.97 |
| 2 | C（mA. h/g） | 150.1 | 150.6 | 149.9 | 151.2 | 150.9 | 149.6 | 149.6 | 150.3 | 0.43 |
| Cm（mA. h/g） | 128.5 | 128.5 | 126.5 | 128.4 | 128.6 | 127.8 | 128.1 | 128.1 | 0.58 |
| η（%） | 85.6 | 85.3 | 84.4 | 84.9 | 85.2 | 85.4 | 85.6 | 85.2 | 0.50 |
| 4 | C（mA. h/g） | 144.2 | 145.1 | 144.2 | 144.7 | 144.5 | 142.5 | 145.3 | 144.4 | 0.64 |
| Cm（mA. h/g） | 120.4 | 121.1 | 120.8 | 120.7 | 120.8 | 119.8 | 121.8 | 120.8 | 0.51 |
| η（%） | 83.5 | 83.5 | 83.8 | 83.4 | 83.6 | 84.1 | 83.8 | 83.7 | 0.28 |
| 5 | C（mA. h/g） | 140.8 | 143.2 | 142.3 | 142.2 | 142.5 | 141.5 | / | 142.1 | 0.59 |
| Cm（mA. h/g） | 128.1 | 129.2 | 129.4 | 128.9 | 129.1 | 128.8 | / | 128.9 | 0.35 |
| η（%） | 91.0 | 90.2 | 90.9 | 90.6 | 90.6 | 91.0 | / | 90.7 | 0.34 |
| 7 | C（mA. h/g） | 142.7 | 141.3 | 142.6 | 137.3 | 140.1 | 133.9 | 140.2 | 139.7 | 2.26 |
| Cm（mA. h/g） | 119.4 | 119.9 | 120.2 | 115.4 | 118.9 | 111.5 | 118.7 | 117.7 | 2.68 |
| η（%） | 83.7 | 84.9 | 84.3 | 84.1 | 84.9 | 83.3 | 84.7 | 84.3 | 0.73 |
| 样品编号 | II-D | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 147.6 | 146.7 | 147.0 | 148.3 | 145.5 | 146.4 | 145.9 | 146.8 | 0.66 |
| Cm（mA. h/g） | 124.4 | 123.8 | 122.6 | 123.1 | 122.2 | 123.8 | 123.5 | 123.3 | 0.62 |
| η（%） | 84.3 | 84.4 | 83.4 | 83.0 | 84.0 | 84.6 | 84.6 | 84.0 | 0.74 |
| 2 | C（mA. h/g） | 146.6 | 147.1 | 146.4 | 148.5 | 146.5 | 147.4 | 145.3 | 146.8 | 0.67 |
| Cm（mA. h/g） | 123.9 | 124.2 | 123.5 | 124.6 | 123.8 | 124.3 | 125.2 | 124.2 | 0.45 |
| η（%） | 84.5 | 84.4 | 84.4 | 83.9 | 84.5 | 84.3 | 86.2 | 84.6 | 0.85 |
| 4 | C（mA. h/g） | 148.2 | 146.8 | 147.1 | 146.9 | 147.3 | 146.5 | 148.5 | 147.3 | 0.51 |
| Cm（mA. h/g） | 122.3 | 120.8 | 121.5 | 121.8 | 121.6 | 120.5 | 123.0 | 121.6 | 0.70 |
| η（%） | 82.5 | 82.3 | 82.6 | 82.9 | 82.6 | 82.3 | 82.8 | 82.6 | 0.30 |
| 5 | C（mA. h/g） | 143.5 | 143.0 | 138.1 | 143.8 | 142.5 | 144.5 | 143.8 | 142.7 | 1.50 |
| Cm（mA. h/g） | 127.2 | 126.8 | 121.7 | 127.2 | 126.0 | 127.6 | 127.1 | 126.2 | 1.63 |
| η（%） | 88.7 | 88.7 | 88.1 | 88.4 | 88.4 | 88.3 | 88.4 | 88.4 | 0.24 |
| 样品编号 | II-E | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 140.0 | 143.6 | 142.5 | 143.8 | 145.2 | 144.2 | 144.7 | 143.4 | 1.27 |
| Cm（mA. h/g） | 123.5 | 125.8 | 124.6 | 125.2 | 123.7 | 126.1 | 124.8 | 124.8 | 0.86 |
| η（%） | 88.2 | 87.6 | 87.5 | 87.1 | 85.2 | 87.4 | 86.2 | 87.0 | 1.20 |
| 2 | C（mA. h/g） | 142.8 | 145.4 | 144.9 | 144.2 | 143.6 | 147.9 | 143.9 | 144.7 | 1.15 |
| Cm（mA. h/g） | 123.8 | 124.9 | 124.2 | 124.5 | 124.6 | 124.1 | 123.7 | 124.3 | 0.35 |
| η（%） | 86.7 | 85.9 | 85.7 | 86.3 | 86.8 | 83.9 | 85.9 | 85.9 | 1.13 |
| 4 | C（mA. h/g） | 144.4 | 145.8 | 144.8 | 144.2 | 143.5 | 145.1 | 145.5 | 144.8 | 0.55 |
| Cm（mA. h/g） | 121.5 | 122.5 | 122.4 | 122.1 | 121.0 | 122.5 | 123.0 | 122.1 | 0.56 |
| η（%） | 84.2 | 84.1 | 84.5 | 84.7 | 84.3 | 84.4 | 84.5 | 84.4 | 0.26 |
| 5 | C（mA. h/g） | 144.2 | 144.0 | 144.0 | 144.6 | 143.5 | 144.6 | / | 144.2 | 0.29 |
| Cm（mA. h/g） | 130.1 | 129.8 | 129.0 | 129.6 | 128.1 | 128.8 | / | 129.2 | 0.57 |
| η（%） | 90.2 | 90.1 | 89.6 | 89.6 | 89.3 | 89.1 | / | 89.7 | 0.48 |

表13 扣式全电池性能试验数据（样品III）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | III-A | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 149.3 | 149.1 | 148.3 | 147.3 | 148.8 | 149.0 | 148.2 | 148.6 | 0.46 |
| Cm（mA. h/g） | 125.7 | 125.0 | 124.8 | 125.2 | 125.3 | 126.1 | 125.3 | 125.3 | 0.35 |
| η（%） | 84.2 | 83.8 | 84.1 | 85.0 | 84.2 | 84.6 | 84.5 | 84.4 | 0.45 |
| 2 | C（mA. h/g） | 148.2 | 149.4 | 149.6 | 148.8 | 149.3 | 149.3 | 148.5 | 149.0 | 0.36 |
| Cm（mA. h/g） | 125.2 | 125.8 | 125.7 | 125.7 | 125.1 | 125.6 | 125.5 | 125.5 | 0.21 |
| η（%） | 84.5 | 84.2 | 84.0 | 84.5 | 83.8 | 84.1 | 84.5 | 84.2 | 0.33 |
| 4 | C（mA. h/g） | 148.7 | 148.4 | 148.2 | 148.6 | 150.0 | 148.4 | 148.3 | 148.7 | 0.41 |
| Cm（mA. h/g） | 125.5 | 125.1 | 124.9 | 125.0 | 127.0 | 125.5 | 124.5 | 125.4 | 0.64 |
| η（%） | 84.4 | 84.3 | 84.3 | 84.1 | 84.7 | 84.6 | 84.0 | 84.3 | 0.29 |
| 5 | C（mA. h/g） | 149.6 | 151.4 | 150.3 | 151.6 | 149.7 | 149.5 | 148.9 | 150.3 | 0.68 |
| Cm（mA. h/g） | 132.1 | 133.7 | 133.0 | 133.9 | 133.7 | 132.3 | 133.4 | 133.2 | 0.54 |
| η（%） | 88.3 | 88.3 | 88.5 | 88.4 | 89.3 | 88.5 | 89.6 | 88.7 | 0.59 |
| 样品编号 | III-B | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 152.7 | 152.3 | 152.0 | 151.1 | 154.2 | 149.2 | 151.4 | 151.8 | 1.02 |
| Cm（mA. h/g） | 133.3 | 132.8 | 132.5 | 133.3 | 133.6 | 131.8 | 133.7 | 133.0 | 0.51 |
| η（%） | 87.3 | 87.2 | 87.2 | 88.2 | 86.6 | 88.3 | 88.3 | 87.6 | 0.78 |
| 2 | C（mA. h/g） | 152.3 | 147.6 | 150.7 | 149.9 | 149.3 | 149.1 | 149.6 | 149.8 | 0.96 |
| Cm（mA. h/g） | 133.5 | 132.0 | 133.6 | 134.0 | 133.8 | 133.1 | 133.6 | 133.4 | 0.50 |
| η（%） | 87.7 | 89.4 | 88.6 | 89.4 | 89.6 | 89.3 | 89.3 | 89.0 | 0.76 |
| 4 | C（mA. h/g） | 158.4 | 158.7 | 157.5 | 158.4 | 158.2 | 157.8 | 156.4 | 157.9 | 0.49 |
| Cm（mA. h/g） | 134.1 | 134.5 | 133.5 | 133.7 | 134.2 | 133.2 | 132.1 | 133.6 | 0.60 |
| η（%） | 84.7 | 84.8 | 84.8 | 84.4 | 84.8 | 84.4 | 84.5 | 84.6 | 0.21 |
| 5 | C（mA. h/g） | 147.9 | 148.4 | 150.6 | 148.6 | 150.9 | 149.8 | 149.9 | 149.4 | 0.77 |
| Cm（mA. h/g） | 132.7 | 133.4 | 134.0 | 133.5 | 131.9 | 133.2 | 134.1 | 133.3 | 0.57 |
| η（%） | 89.8 | 89.9 | 89.0 | 89.8 | 87.4 | 88.9 | 89.4 | 89.2 | 0.98 |
| 样品编号 | III-C | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 148.6 | 151.8 | 149.4 | 151.1 | 152.8 | 152.5 | 151.4 | 151.1 | 1.03 |
| Cm（mA. h/g） | 123.8 | 123.0 | 123.7 | 123.9 | 123.6 | 123.5 | 123.6 | 123.6 | 0.24 |
| η（%） | 83.3 | 81.0 | 82.8 | 82.0 | 80.9 | 81.0 | 81.6 | 81.8 | 1.16 |
| 2 | C（mA. h/g） | 150.7 | 151.8 | 148.4 | 148.4 | 148.8 | 150.5 | 149.2 | 149.7 | 0.89 |
| Cm（mA. h/g） | 123.9 | 123.1 | 123.5 | 123.6 | 123.2 | 123.6 | 123.1 | 123.4 | 0.25 |
| η（%） | 82.2 | 81.1 | 83.2 | 83.3 | 82.8 | 82.1 | 82.5 | 82.5 | 0.92 |
| 4 | C（mA. h/g） | 148.2 | 148.4 | 148.3 | 148.0 | 148.6 | 148.4 | 148.3 | 148.3 | 0.13 |
| Cm（mA. h/g） | 122.3 | 121.7 | 121.8 | 122.3 | 122.1 | 121.9 | 121.7 | 122.0 | 0.22 |
| η（%） | 82.5 | 82.0 | 82.1 | 82.6 | 82.2 | 82.1 | 82.1 | 82.2 | 0.29 |
| 5 | C（mA. h/g） | 149.4 | 149.1 | 150.4 | 150.6 | 151.2 | 150.0 | 151.0 | 150.2 | 0.52 |
| Cm（mA. h/g） | 134.0 | 132.8 | 134.5 | 133.8 | 134.0 | 133.9 | 134.3 | 133.9 | 0.40 |
| η（%） | 89.7 | 89.1 | 89.4 | 88.8 | 88.6 | 89.3 | 89.0 | 89.1 | 0.42 |
| 样品编号 | III-D | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 147.1 | 145.1 | 146.6 | 145.7 | 145.3 | 146.2 | 146.5 | 146.1 | 0.50 |
| Cm（mA. h/g） | 128.2 | 126.2 | 129.2 | 125.5 | 127.3 | 127.4 | 126.6 | 127.2 | 0.98 |
| η（%） | 87.2 | 87.0 | 88.1 | 86.1 | 87.6 | 87.1 | 86.4 | 87.1 | 0.78 |
| 2 | C（mA. h/g） | 144.7 | 142.6 | 146.3 | 144.8 | 141.8 | 146.1 | 145.1 | 144.5 | 1.17 |
| Cm（mA. h/g） | 127.5 | 125.2 | 127.3 | 126.3 | 125.1 | 128.4 | 127.4 | 126.7 | 0.98 |
| η（%） | 88.1 | 87.8 | 87.0 | 87.2 | 88.2 | 87.9 | 87.8 | 87.7 | 0.51 |
| 4 | C（mA. h/g） | 151.1 | 151.3 | 151.1 | 151.7 | 150.8 | 149.5 | 151.3 | 151.0 | 0.47 |
| Cm（mA. h/g） | 124.1 | 124.8 | 124.6 | 125.4 | 124.5 | 123.0 | 124.3 | 124.4 | 0.59 |
| η（%） | 82.1 | 82.5 | 82.5 | 82.7 | 82.6 | 82.3 | 82.2 | 82.4 | 0.25 |
| 5 | C（mA. h/g） | 150.0 | 150.7 | 149.7 | 149.7 | 105.3 | 150.9 | 151.5 | 150.4 | 0.49 |
| Cm（mA. h/g） | 132.1 | 132.4 | 132.1 | 131.8 | 89.3 | 132.6 | 133.6 | 132.4 | 0.48 |
| η（%） | 88.1 | 87.8 | 88.2 | 88.1 | 84.8 | 87.9 | 88.2 | 88.1 | 0.19 |
| 样品编号 | III-E | | | | | | | | | |
| 实验室 | 测试项目 | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 均值 | RSD/% |
| 1 | C（mA. h/g） | 150.4 | 147.1 | 146.0 | 147.0 | 148.3 | 147.7 | 148.4 | 147.9 | 0.94 |
| Cm（mA. h/g） | 127.6 | 128.2 | 128.2 | 128.7 | 127.9 | 127.7 | 128.5 | 128.1 | 0.32 |
| η（%） | 84.8 | 87.1 | 87.8 | 87.5 | 86.3 | 86.5 | 86.6 | 86.7 | 1.13 |
| 2 | C（mA. h/g） | 151.6 | 149.6 | 149.9 | 150.5 | 151.0 | 151.3 | 149.2 | 150.4 | 0.60 |
| Cm（mA. h/g） | 128.6 | 128.3 | 128.8 | 129.1 | 128.3 | 129.5 | 130.4 | 129.0 | 0.58 |
| η（%） | 84.8 | 85.8 | 85.9 | 85.8 | 85.0 | 85.6 | 87.4 | 85.8 | 0.98 |
| 4 | C（mA. h/g） | 149.4 | 149.6 | 148.9 | 149.4 | 151.4 | 148.9 | 149.3 | 149.6 | 0.57 |
| Cm（mA. h/g） | 127.3 | 126.9 | 126.5 | 127.1 | 128.5 | 126.2 | 127.5 | 127.1 | 0.59 |
| η（%） | 85.2 | 84.9 | 85.0 | 85.1 | 84.9 | 84.8 | 85.4 | 85.0 | 0.27 |
| 5 | C（mA. h/g） | 151.6 | 151.4 | 151.5 | 150.5 | 150.7 | 151.7 | 151.4 | 151.3 | 0.31 |
| Cm（mA. h/g） | 134.3 | 133.7 | 135.0 | 134.5 | 134.4 | 134.7 | 133.7 | 134.3 | 0.36 |
| η（%） | 88.6 | 88.4 | 89.1 | 89.4 | 89.2 | 88.8 | 88.3 | 88.8 | 0.47 |
| 7 | C（mA. h/g） | 144.3 | 143.7 | 146.8 | 151.3 | 141.2 | 144.6 | 145.1 | 145.3 | 2.17 |
| Cm（mA. h/g） | 121.4 | 118.8 | 122.4 | 124.2 | 118.2 | 117.7 | 122.5 | 120.7 | 2.10 |
| η（%） | 84.2 | 82.6 | 83.4 | 82.1 | 83.7 | 81.4 | 84.4 | 83.1 | 1.35 |

**3.3.7 扣式半电池测试方法精密度计算**

**3.3.7.1 数据汇总统计**

表14 不同实验室间数据汇总统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 样品编号 | | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平9 | 水平9 |
| 1 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 134.3 | 132.6 | 131.3 | 133.5 | 132.2 | 132.6 | 134.2 | 133.5 | 135.2 |
| R | 0.59 | 0.87 | 0.73 | 0.3 | 0.78 | 0.3 | 0.46 | 0.57 | 0.29 |
| η（%） | 均值 | 91 | 91.2 | 91.4 | 88.7 | 89.5 | 88.4 | 86.3 | 87.7 | 86.4 |
| R | 0.97 | 0.67 | 0.43 | 0.12 | 0.24 | 0.48 | 0.41 | 0.38 | 0.36 |
| 2 | Cm（mA. h/g） | 均值 | / | 132.3 | 133.4 | / | 131.8 | 131.6 | / | 133.4 | 134.2 |
| R | / | 0.58 | 0.47 | / | 0.78 | 0.23 | / | 0.24 | 0.3 |
| η（%） | 均值 | / | 91.6 | 90.7 | / | 89.7 | 87.8 | / | 87.6 | 86.7 |
| R | / | 0.33 | 0.3 | / | 0.27 | 1.01 | / | 0.23 | 0.26 |
| 3 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 130 | / | / | 127.5 | / | / | / | / | 134.1 |
| R | 0.41 | / | / | 2.64 | / | / | / | / | 0.35 |
| η（%） | 均值 | 84.8 | / | / | 82 | / | / | / | / | 86.3 |
| R | 1.11 | / | / | 1.45 | / | / | / | / | 0.55 |
| 4 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 132.6 | 133.7 | 133.4 | 130.5 | 131.2 | 131.1 | 134.9 | 136.3 | 135.8 |
| R | 0.58 | 0.55 | 0.52 | 0.61 | 0.23 | 0.51 | 0.51 | 0.55 | 0.53 |
| η（%） | 均值 | 88.8 | 91 | 91.3 | 84.9 | 86.9 | 86.7 | 85.8 | 87.2 | 87.1 |
| R | 0.69 | 0.63 | 0.4 | 0.37 | 0.32 | 0.25 | 0.31 | 0.33 | 0.32 |
| 5 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 136.2 | 136.1 | 133.6 | / | / | / | / | / | / |
| R | 0.88 | 0.54 | 0.46 | / | / | / | / | / | / |
| η（%） | 均值 | 92.7 | 93.1 | 92.3 | / | / | / | / | / | / |
| R | 0.62 | 0.56 | 0.54 | / | / | / | / | / | / |
| 6 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 130.9 | / | / | 132.9 | 130.1 | 131.1 | 141.2 | 129.9 | 134.5 |
| R | 0.54 | / | / | 0.43 | 0.33 | 0.52 | 0.52 | 0.45 | 0.76 |
| η（%） | 均值 | 90.2 | / | / | 88 | 89.6 | 86.3 | 90.3 | 85.9 | 87 |
| R | 0.63 | / | / | 0.75 | 0.78 | 0.43 | 0.34 | 0.65 | 0.69 |
| 7 | Cm（mA. h/g） | 均值 | / | / | / | / | / | / | 129.2 | / | 128.3 |
| R | / | / | / | / | / | / | 4.58 | / | 3.89 |
| η（%） | 均值 | / | / | / | / | / | / | 84.8 | / | 84.9 |
| R | / | / | / | / | / | / | 1.03 | / | 3.96 |
| 8 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 134.3 | 132.1 | 132.4 | 132 | 131.7 | 132.2 | 132.6 | 132.4 | 135.2 |
| R | 0.17 | 0.47 | 0.38 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.39 | 0.16 | 0.27 |
| η（%） | 均值 | 91.7 | 90.9 | 91.4 | 88 | 89.6 | 88.6 | 86.1 | 88.2 | 86.4 |
| R | 0.35 | 0.52 | 0.64 | 0.59 | 0.35 | 0.5 | 0.62 | 0.53 | 0.32 |
| 9 | Cm（mA. h/g） | 均值 | / | / | / | / | / | / | 133.6 | / | / |
| R | / | / | / | / | / | / | 1.21 | / | / |
| η（%） | 均值 | / | / | / | / | / | / | 85.5 | / | / |
| R | / | / | / | / | / | / | 0.77 | / | / |

剔除离群实验室和异常数据后，运用统计学原理进行了柯克伦检验和格拉布斯检验以验证测试数据的重复性和再现性。

**3.3.7.2 柯克伦检验**

根据柯克伦检验的临界值表：（柯克伦检验没有n=7时的临界值可查询，按n=6时的临界值进行异常值的排除）

1. 对n=6，p=6，柯克伦检验5%临界值为0.445，1%临界值为0.520；
2. 对n=6，p=5，柯克伦检验5%临界值为0.506，1%临界值为0.588；
3. 对n=6，p=4，柯克伦检验5%临界值为0.590，1%临界值为0.676；
4. 对n=6，p=3，柯克伦检验5%临界值为0.707，1%临界值为0.793。

对扣式半电池测试方法的首次放电比容量和首次充放电效率实验数据进行柯克伦检验，检验结果表明：首次放电比容量的水平7存在离群值；首次充放电效率的水平5和水平6存在歧离值。经讨论暂保留异常值进行格拉布斯检验。柯克伦检验数据见下表：

表15 首次放电比容量柯克伦检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 0.71 | 1.07 | 0.88 | 0.74 | 1.04 | 0.63 | 1.70 | 0.70 | 0.79 |
| ∑s2 | 1.68 | 2.44 | 2.07 | 1.38 | 2.63 | 1.22 | 3.86 | 1.10 | 1.64 |
| 统计量C | 0.305 | 0.466 | 0.379 | 0.397 | 0.408 | 0.325 | 0.749 | 0.450 | 0.378 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | Y | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | Y | N | N |

表16 首次充放电效率柯克伦检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 0.76 | 0.57 | 0.54 | 0.61 | 0.65 | 0.82 | 0.81 | 0.55 | 0.55 |
| ∑s2 | 1.33 | 1.11 | 0.82 | 0.61 | 0.62 | 1.16 | 1.35 | 0.70 | 0.76 |
| 统计量C | 0.431 | 0.291 | 0.362 | 0.610 | 0.675 | 0.587 | 0.485 | 0.440 | 0.403 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | Y | Y | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

**3.3.7.3 格拉布斯检验**

根据格拉布斯检验的临界值表：

1. 对p=6，格拉布斯检验5%临界值为1.887，1%临界值为1.973；
2. 对p=5，格拉布斯检验5%临界值为1.715，1%临界值为1.764；
3. 对p=4，格拉布斯检验5%临界值为1.481，1%临界值为1.496；
4. 对p=3，格拉布斯检验5%临界值为1.155，1%临界值为1.155。

对扣式半电池测试方法的首次放电比容量和首次充放电效率实验数据进行格拉布斯检验，检验结果表明：各水平均无异常值。格拉布斯检验数据见下表：

表17 首次放电比容量格拉布斯检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值最大值 | 134.3 | 133.7 | 133.6 | 133.5 | 132.2 | 132.6 | 134.9 | 136.3 | 135.8 |
| 均值最小值 | 130.0 | 132.1 | 131.3 | 128.8 | 130.1 | 131.1 | 132.6 | 132.4 | 134.1 |
| 均值 | 132.4 | 132.7 | 132.8 | 131.5 | 131.4 | 131.7 | 133.9 | 133.9 | 134.9 |
| s | 1.957 | 0.709 | 0.987 | 1.887 | 0.811 | 0.676 | 0.972 | 1.661 | 0.658 |
| Gmax | 0.969 | 1.416 | 0.825 | 1.022 | 0.952 | 1.289 | 0.964 | 1.434 | 1.397 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 1.221 | 0.862 | 1.549 | 1.454 | 1.604 | 0.951 | 1.403 | 0.888 | 1.144 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

表18 首次充放电效率格拉布斯检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值最大值 | 92.7 | 93.1 | 92.3 | 88.7 | 89.7 | 88.6 | 86.3 | 87.1 | 87.1 |
| 均值最小值 | 90.2 | 90.9 | 90.7 | 88.0 | 89.5 | 86.3 | 84.8 | 86.3 | 86.3 |
| 均值 | 91.4 | 91.6 | 91.4 | 88.3 | 89.6 | 87.5 | 85.7 | 86.7 | 86.7 |
| s | 1.080 | 0.916 | 0.588 | 0.376 | 0.098 | 1.022 | 0.590 | 0.373 | 0.351 |
| Gmax | 1.248 | 1.700 | 1.518 | 1.155 | 1.463 | 1.040 | 0.998 | 1.158 | 1.357 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 1.116 | 0.736 | 1.276 | 0.582 | 0.793 | 1.232 | 1.558 | 1.166 | 1.111 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

**3.3.7.4 重复性限和再现性限计算**

对实验数据进行重复性限和再现性计算，计算结果如下表所示：

表19 首次放电比容量重复性限和再现性限计算

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值 | 132.4 | 132.7 | 132.8 | 131.5 | 131.4 | 131.7 | 133.9 | 133.9 | 134.9 |
| Sr | 0.579 | 0.781 | 0.643 | 0.533 | 0.725 | 0.495 | 0.939 | 0.523 | 0.513 |
| SR | 2.029 | 1.012 | 1.152 | 1.904 | 1.053 | 0.817 | 1.315 | 1.730 | 0.817 |
| 重复性限r | 1.621 | 2.187 | 1.800 | 1.493 | 2.031 | 1.386 | 2.630 | 1.465 | 1.436 |
| 再现性限R | 5.682 | 2.835 | 3.227 | 5.332 | 2.948 | 2.287 | 3.683 | 4.844 | 2.287 |

表20 首次充放电效率重复性限和再现性限计算

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-a | I-b | I-c | II-a | II-b | II-c | III-a | III-b | III-c |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值 | 91.4 | 91.6 | 91.4 | 88.3 | 89.6 | 87.5 | 85.7 | 86.7 | 86.7 |
| Sr | 0.577 | 0.472 | 0.405 | 0.450 | 0.395 | 0.481 | 0.519 | 0.374 | 0.357 |
| SR | 1.205 | 1.015 | 0.697 | 0.561 | 0.378 | 1.115 | 0.761 | 0.508 | 0.482 |
| 重复性限r | 1.615 | 1.322 | 1.134 | 1.261 | 1.105 | 1.347 | 1.454 | 1.046 | 0.998 |
| 再现性限R | 3.373 | 2.843 | 1.952 | 1.571 | 1.059 | 3.123 | 2.130 | 1.424 | 1.349 |

**3.3.8 扣式全电池测试方法精密度计算**

**3.3.8.1 数据汇总统计**

表21 不同实验室间数据汇总统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 样品编号 | | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D | II-E |
| 水平 | | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 | 水平10 |
| 1 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 123.4 | 126.4 | 122.5 | 122.5 | 126.4 | 124.1 | 126.6 | 128 | 123.3 | 124.8 |
| R | 0.85 | 0.93 | 0.16 | 0.7 | 0.65 | 0.18 | 0.54 | 0.94 | 0.62 | 0.86 |
| η（%） | 均值 | 85.5 | 88.2 | 83.7 | 85.7 | 89.3 | 84.1 | 86.6 | 86.2 | 84 | 87 |
| R | 0.66 | 0.57 | 0.22 | 0.75 | 0.47 | 0.75 | 0.8 | 0.97 | 0.74 | 1.2 |
| 2 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 122.7 | 126.5 | 122.2 | 122.1 | 126.1 | 123.6 | 128 | 128.1 | 124.2 | 124.3 |
| R | 0.54 | 0.54 | 0.33 | 0.27 | 0.65 | 0.52 | 0.6 | 0.58 | 0.45 | 0.35 |
| η（%） | 均值 | 86.5 | 87.4 | 84.1 | 84.8 | 89.4 | 84.5 | 86 | 85.2 | 84.6 | 85.9 |
| R | 0.44 | 0.7 | 0.33 | 0.85 | 0.91 | 0.56 | 0.33 | 0.5 | 0.85 | 1.13 |
| 4 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 121.3 | 132.6 | 120.3 | 121.8 | 123.1 | 122.6 | 134.1 | 120.8 | 121.6 | 122.1 |
| R | 0.65 | 0.76 | 0.17 | 0.74 | 0.61 | 0.75 | 0.34 | 0.51 | 0.7 | 0.56 |
| η（%） | 均值 | 85.4 | 85.1 | 83.9 | 83.7 | 87 | 84.7 | 85 | 83.7 | 82.6 | 84.4 |
| R | 0.38 | 0.25 | 0.3 | 0.21 | 0.23 | 0.29 | 0.32 | 0.28 | 0.3 | 0.26 |
| 5 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 126.9 | 126.6 | / | 126.7 | 126.3 | 129 | 129.2 | 128.9 | 126.2 | 129.2 |
| R | 1.4 | 0.34 | / | 0.35 | 0.79 | 0.6 | 0.39 | 0.35 | 1.63 | 0.57 |
| η（%） | 均值 | 87.4 | 88.6 | / | 88.6 | 89.5 | 90 | 90.4 | 90.7 | 88.4 | 89.7 |
| R | 2.71 | 0.5 | / | 0.54 | 0.75 | 0.39 | 0.34 | 0.34 | 0.24 | 0.48 |
| 7 | Cm（mA. h/g） | 均值 | / | / | / | / | / | / | / | 117.7 | / | / |
| R | / | / | / | / | / | / | / | 2.68 | / | / |
| η（%） | 均值 | / | / | / | / | / | / | / | 84.3 | / | / |
| R | / | / | / | / | / | / | / | 0.73 | / | / |

表21 不同实验室间数据汇总统计（续）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 样品编号 | | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 1 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 125.3 | 133 | 123.6 | 127.2 | 128.1 |
| R | 0.35 | 0.51 | 0.24 | 0.98 | 0.32 |
| η（%） | 均值 | 84.4 | 87.6 | 81.8 | 87.1 | 86.7 |
| R | 0.45 | 0.78 | 1.16 | 0.78 | 1.13 |
| 2 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 125.5 | 133.4 | 123.4 | 126.7 | 129 |
| R | 0.21 | 0.5 | 0.25 | 0.98 | 0.58 |
| η（%） | 均值 | 84.2 | 89 | 82.5 | 87.7 | 85.8 |
| R | 0.33 | 0.76 | 0.92 | 0.51 | 0.98 |
| 4 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 125.4 | 133.6 | 122 | 124.4 | 127.1 |
| R | 0.64 | 0.6 | 0.22 | 0.59 | 0.59 |
| η（%） | 均值 | 84.3 | 84.6 | 82.2 | 82.4 | 85 |
| R | 0.29 | 0.21 | 0.29 | 0.25 | 0.27 |
| 5 | Cm（mA. h/g） | 均值 | 133.2 | 133.3 | 133.9 | 132.4 | 134.3 |
| R | 0.54 | 0.57 | 0.4 | 0.48 | 0.36 |
| η（%） | 均值 | 88.7 | 89.2 | 89.1 | 88.1 | 88.8 |
| R | 0.59 | 0.98 | 0.42 | 0.19 | 0.47 |
| 7 | Cm（mA. h/g） | 均值 | / | / | / | / | 120.7 |
| R | / | / | / | / | 2.1 |
| η（%） | 均值 | / | / | / | / | 83.1 |
| R | / | / | / | / | 1.35 |

剔除离群实验室和异常数据后，运用统计学原理进行了柯克伦检验和格拉布斯检验以验证测试数据的重复性和再现性。

**3.3.8.2 柯克伦检验**

根据柯克伦检验的临界值表：（柯克伦检验没有n=7时的临界值可查询，按n=6时的临界值进行异常值的排除）

1. 对n=6，p=4，柯克伦检验5%临界值为0.590，1%临界值为0.676；
2. 对n=6，p=3，柯克伦检验5%临界值为0.707，1%临界值为0.783。

对扣式全电池测试方法的首次放电比容量和首次充放电效率实验数据进行柯克伦检验，检验结果表明：首次放电比容量各水平均无异常值；首次充放电效率的水平8存在离群值，水平7存在歧离值。经讨论暂保留异常值进行格拉布斯检验。柯克伦检验数据见下表：

表22 首次放电比容量柯克伦检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 2.15 | 1.74 | 0.21 | 1.59 | 1.60 | 1.64 | 1.13 | 1.87 | 1.02 |
| ∑s2 | 0.97 | 1.09 | 0.37 | 0.83 | 0.77 | 0.85 | 0.72 | 1.11 | 0.70 |
| 统计量C | 0.435 | 0.684 | 0.661 | 0.433 | 0.366 | 0.446 | 0.453 | 0.656 | 0.488 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

表22 首次放电比容量柯克伦检验异常统计（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 1.39 | 0.35 | 1.82 | 0.21 | 3.13 | 1.11 |
| ∑s2 | 0.91 | 0.40 | 0.74 | 0.28 | 1.15 | 0.70 |
| 统计量C | 0.597 | 0.463 | 0.302 | 0.375 | 0.426 | 0.439 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |

表23 首次充放电效率柯克伦检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 1.39 | 0.74 | 0.15 | 0.83 | 1.35 | 0.58 | 0.54 | 0.80 | 0.82 |
| ∑s2 | 0.84 | 0.56 | 0.26 | 0.67 | 0.88 | 0.58 | 0.64 | 0.77 | 0.67 |
| 统计量C | 0.501 | 0.430 | 0.446 | 0.536 | 0.577 | 0.578 | 0.755 | 0.743 | 0.538 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | Y | Y | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | Y | N |

表23 首次充放电效率柯克伦检验异常统计（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 重复测试数n | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| smax | 2.45 | 1.06 | 1.45 | 1.28 | 1.88 | 2.30 |
| ∑s2 | 1.27 | 0.82 | 0.81 | 0.88 | 1.15 | 0.91 |
| 统计量C | 0.656 | 0.628 | 0.456 | 0.604 | 0.699 | 0.359 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |

**3.3.8.3 格拉布斯检验**

根据格拉布斯检验的临界值表：

1. 对p=5，格拉布斯检验5%临界值为1.715，1%临界值为1.764；
2. 对p=4，格拉布斯检验5%临界值为1.481，1%临界值为1.496；
3. 对p=3，格拉布斯检验5%临界值为1.155，1%临界值为1.155。

对扣式全电池测试方法的首次放电比容量和首次充放电效率实验数据进行格拉布斯检验，检验结果表明：首次放电比容量的水平4最大值存在歧离值；首次充放电效率的水平5最小值存在歧离值，其余各水平均无异常值，经决定异常值先予以保留。格拉布斯检验数据见下表：

表24 首次放电比容量格拉布斯检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值最大值 | 123.4 | 126.6 | 122.5 | 126.7 | 126.4 | 129.0 | 129.2 | 128.9 | 127.0 |
| 均值最小值 | 121.3 | 126.4 | 120.3 | 121.8 | 126.0 | 122.6 | 126.6 | 128.0 | 123.3 |
| 均值 | 122.5 | 126.5 | 121.6 | 123.3 | 126.2 | 124.8 | 127.9 | 128.3 | 124.8 |
| s | 1.111 | 0.115 | 1.702 | 2.266 | 0.230 | 2.834 | 1.317 | 0.529 | 1.901 |
| Gmax | 0.878 | 1.072 | 0.478 | 1.489 | 1.153 | 1.461 | 0.973 | 1.149 | 1.124 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | Y | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 1.088 | 0.907 | 0.806 | 0.635 | 0.628 | 0.788 | 1.025 | 0.673 | 0.791 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

表24 首次放电比容量格拉布斯检验异常统计（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 均值最大值 | 124.8 | 125.9 | 133.6 | 123.6 | 127.2 | 129.0 |
| 均值最小值 | 122.1 | 125.1 | 133.0 | 122.0 | 124.4 | 127.1 |
| 均值 | 123.7 | 125.4 | 133.3 | 123.0 | 126.1 | 128.1 |
| s | 1.409 | 0.425 | 0.255 | 0.890 | 1.510 | 0.929 |
| Gmax | 0.764 | 1.100 | 1.190 | 0.663 | 0.722 | 0.984 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 1.132 | 0.855 | 1.218 | 1.150 | 1.141 | 1.015 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |

表25 首次充放电效率格拉布斯检验异常统计

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值最大值 | 88.3 | 88.6 | 84.1 | 85.7 | 89.6 | 84.7 | 86.6 | 86.2 | 84.6 |
| 均值最小值 | 85.4 | 85.1 | 83.7 | 83.7 | 87.0 | 84.1 | 85.0 | 83.7 | 82.6 |
| 均值 | 86.5 | 87.3 | 83.9 | 84.7 | 88.8 | 84.4 | 85.9 | 85.0 | 83.7 |
| s | 1.380 | 1.544 | 0.192 | 0.977 | 1.243 | 0.299 | 0.812 | 1.040 | 1.052 |
| Gmax | 1.291 | 0.803 | 0.981 | 0.945 | 0.592 | 0.795 | 0.947 | 1.126 | 0.823 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 0.819 | 1.422 | 1.018 | 1.047 | 1.494 | 1.123 | 1.046 | 1.304 | 1.113 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | Y | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N | N | N | N |

表25 首次充放电效率格拉布斯检验异常统计（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 均值最大值 | 87.3 | 85.3 | 89.2 | 82.5 | 87.7 | 88.8 |
| 均值最小值 | 84.4 | 84.0 | 87.6 | 81.8 | 87.1 | 83.4 |
| 均值 | 85.9 | 84.5 | 88.6 | 82.2 | 87.5 | 85.9 |
| s | 1.467 | 0.714 | 0.875 | 0.331 | 0.335 | 2.013 |
| Gmax | 0.992 | 1.116 | 0.649 | 0.878 | 0.758 | 1.440 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| Gmin | 1.008 | 0.815 | 1.152 | 1.088 | 1.133 | 1.258 |
| 歧离值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |
| 离群值（Y/N） | N | N | N | N | N | N |

**3.3.8.4 重复性限和再现性限计算**

对实验数据进行重复性限和再现性计算，计算结果如下表所示：

表26 首次放电比容量重复性限和再现性限计算

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值 | 122.5 | 126.5 | 121.6 | 123.3 | 126.2 | 124.8 | 127.9 | 128.3 | 124.8 |
| Sr | 0.847 | 0.763 | 0.263 | 0.630 | 0.734 | 0.640 | 0.615 | 0.806 | 0.587 |
| SR | 1.360 | 0.715 | 1.219 | 2.340 | 0.715 | 2.895 | 1.435 | 0.904 | 1.933 |
| 重复性限r | 2.372 | 2.135 | 0.736 | 1.765 | 2.054 | 1.791 | 1.722 | 2.257 | 1.643 |
| 再现性限R | 3.809 | 2.003 | 3.414 | 6.552 | 2.002 | 8.106 | 4.017 | 2.532 | 5.412 |

表26 首次放电比容量重复性限和再现性限计算（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 均值 | 123.7 | 125.4 | 133.3 | 123.0 | 126.1 | 128.1 |
| Sr | 0.680 | 0.342 | 0.675 | 0.265 | 1.021 | 0.607 |
| SR | 1.543 | 0.528 | 0.675 | 0.923 | 1.782 | 1.086 |
| 重复性限r | 1.903 | 0.956 | 1.890 | 0.743 | 2.860 | 1.701 |
| 再现性限R | 4.322 | 1.479 | 1.890 | 2.585 | 4.989 | 3.040 |

表27 首次充放电效率重复性限和再现性限计算

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | I-A | I-B | I-C | I-D | I-E | II-A | II-B | II-C | II-D |
| 水平 | 水平1 | 水平2 | 水平3 | 水平4 | 水平5 | 水平6 | 水平7 | 水平8 | 水平9 |
| 均值 | 86.5 | 87.3 | 83.9 | 84.7 | 88.8 | 84.4 | 85.9 | 85.0 | 83.7 |
| Sr | 0.562 | 0.429 | 0.223 | 0.526 | 0.582 | 0.441 | 0.426 | 0.531 | 0.524 |
| SR | 1.407 | 1.595 | 0.282 | 1.091 | 1.355 | 0.506 | 0.902 | 1.357 | 1.159 |
| 重复性限r | 1.575 | 1.202 | 0.624 | 1.473 | 1.629 | 1.236 | 1.192 | 1.486 | 1.468 |
| 再现性限R | 3.939 | 4.465 | 0.790 | 3.056 | 3.793 | 1.418 | 2.527 | 3.801 | 3.244 |

表27 首次充放电效率重复性限和再现性限计算（续）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | II-E | III-A | III-B | III-C | III-D | III-E |
| 水平 | 水平10 | 水平11 | 水平12 | 水平13 | 水平14 | 水平15 |
| 均值 | 85.9 | 84.5 | 88.6 | 82.2 | 87.5 | 85.9 |
| Sr | 0.903 | 0.595 | 0.694 | 0.661 | 0.791 | 0.680 |
| SR | 1.689 | 0.902 | 1.086 | 0.696 | 0.805 | 2.033 |
| 重复性限r | 2.529 | 1.665 | 1.944 | 1.850 | 2.215 | 1.905 |
| 再现性限R | 4.729 | 2.525 | 3.040 | 1.948 | 2.255 | 5.693 |

**3.3.9 试验数据允许差确定**

扣式半电池测试法：对实验数据按照正态经验累积分布函数拟合，确定当置信度≥85%（即参与验证实验室中有85%以上的验证数据符合要求）时，首次放电比容量的重复性限为2.2，再现性限为5.3；首次充放电效率的重复性限为1.4，再现性限为3.1。

扣式全电池测试法：对实验数据按照正态经验累积分布函数拟合，确定当置信度≥85%（即参与验证实验室中有85%以上的验证数据符合要求）时，首次放电比容量的重复性限为2.2，再现性限为5.4；首次充放电效率的重复性限为1.9，再现性限为4.4。

由于扣式全电池法的首次放电比容量的重复性限和再现性限的差值较大，经讨论决定将其重复性限调整为3.0。因此确定允许差范围为：

**（1）扣式半电池试验**

首次放电比容量：同一实验室间同一批次电池的首次放电比容量允许差为±1.2 mA·h/g，不同独立实验室间同一批次电池的首次放电比容量允许差为±2.5 mA·h/g。

首次充放电效率：同一实验室间同一批次电池的首次充放电效率允许差为±0.7%，不同独立实验室间同一批次电池的首次充放电效率允许差为±1.5%。

**（2）扣式全电池试验**

首次放电比容量：同一实验室间同一批次电池的首次放电比容量允许差为±1.5 mA·h/g，不同独立实验室间同一批次电池的首次放电比容量允许差为±3.0 mA·h/g。

首次充放电效率：同一实验室间同一批次电池的首次充放电效率允许差为±1.0%，不同独立实验室间同一批次电池的首次充放电效率允许差为±2.2%。

**四、预期达到的社会效益等情况**

**4.1 标准制定的必要性**

**4.1.1 行业快速发展的需求**

在锂离子电池工业化推广中，对电池容量、安全性、综合成本的要求较高，正极材料成为阻碍其发展的主要瓶颈。目前广泛应用的正极材料主要有以下几种：镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂、磷酸铁锂、钴酸锂、锰酸锂等，其中钴酸锂材料价格较贵且存在严重的安全隐患，锰酸锂材料的充放电性能和循环性能较差，使得这两种正极材料的应用受到很大的限制。镍锰酸锂是在锰酸锂的基础上改进的正极材料，与锰酸锂相比，其在高温循环下的稳定性大大提高。此外，镍锰酸锂还具有输出电压高、成本低、环境友好的优点，是一种具有诱人前景的锂离子电池正极材料。

据SMM上海有色金属网钴锂新能源公布，2021年中国锰酸锂产量总计8.74万吨，同比上涨25%，近年来，不少锰酸锂企业大幅扩产，锰酸锂材料供应量水涨船高。按照镍锰酸锂与锰酸锂的产能比约为20%计算，2021年镍锰酸锂的产能约为2.54万吨。目前镍锰酸锂的生产还存在较高的技术壁垒，虽然生产原料成本较含钴正极材料低，但是技术和设备投资偏高，每吨价格约为15万元。随着新能源汽车和电子产品对上游行业高能量比正极材料需求量的增长，使得镍锰酸锂在锂离子电池正极材料市场中已经占据了一席之地。对于供应商而言，测试方法是其实现产品质量控制必不可少的工具；对于采购商而言，测试方法是对货物质量进行检验的基础。为了避免因测试方法不同导致对产品质量发生纠纷，减少贸易摩擦，必须制定统一、规范的镍锰酸锂电化学性能测试方法标准。

**4.1.2 无配套电化学性能测试方法**

产品标准GB/T 37202《镍锰酸锂》已于2018年发布，该标准对产品的电化学性能进行了规定。镍锰酸锂的首次放电比容量、首次充放电效率、循环寿命等性能直接影响镍锰酸锂产品的用途，也对下游电池企业的产品性能具有影响。但目前该产品标准还无配套的电化学性能测试方法标准，基于市场中供应商、客户的需求，获得准确、客观的材料性能参数，必须对镍锰酸锂的电化学性能测试方法进行规范和统一。只有在统一测试方法的前提下才能获得具有可比性的测试结果，只有基于科学有效的数据才能作出工艺、配方改进等技术创新以及原料选择等生产管理决策。

**4.2 标准制定的可行性**

扣式半电池法已广泛应用于锂离子电池正极材料的电化学性能测试，如GB/T 23365—2009 《钴酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》、GB/T 39864—2021《锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》、GB/T 37201—2018 《镍钴锰酸锂电化学性能测试 首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》。对于首次放电比容量及首次充放电效率性能的测试结果准确、可靠，且方法简单，测试周期短。

本标准中引入扣式全电池法，据调查，国内已有多家企业使用扣式全电池法测锂离子电池正极材料的电化学性能，该方法可更加真实反映正极材料的电化学性能，评估正负极之间的相互影响。目前该方法的标准缺失，亟需统一和规范，且值得推广。

**4.3 预期产生的经济效益和社会效益**

镍锰酸锂是具有高于4.4 V放电平台的正极材料，是一种理想的下一代商用电池材料，比传统的磷酸铁锂的能量密度高出20%~30%，且缓解了正极材料对钴资源的依赖，降低原料的使用成本。本标准的制定规范了镍锰酸锂产品的电化学性能的检测方法，完善了锂离子电池正极材料镍锰酸锂配套的电化学性能分析方法标准。使得镍锰酸锂生产企业、使用企业及第三方检测机构有标准可依，减少供应商和客户之间因检测误差造成的商业纠纷。本标准的制定落实了国家的政策要求，促进锂离子电池正极材料行业发展和电动汽车在国内市场的普及，为绿色低碳事业做贡献。

**五、采用国际标准和国外先进标准的情况**

**5.1 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。

**5.2 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。

**5.3 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。

**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、标准作为强制性标准或推荐性标准的建议**

建议作为推荐性国家标准。

**九、贯彻标准的要求和措施建议**

由于本标准反映了镍锰酸锂电化学性能的具体测试方法及其可靠性，因此可积极向镍锰酸锂的生产厂家、使用方、研究院、科研院所等相关方推荐采用本标准。

**十、废止现行有关标准的建议**

无。

**十一、其他应予说明的事项**

无。

**《镍锰酸锂电化学性能测试**

**首次放电比容量及首次充放电效率测试方法》标准编制组**

**二〇二二年十月**