



深圳市动力电池回收利用 机制与政策研究

Research on the Power Battery Recycling
Mechanism and Policy for Shenzhen

绿色低碳发展基金会

2018.06.08

Green & Low-Carbon Development Foundation

June 8 ,2018

目录

一、项目背景、意义.....	1
二、动力电池回收利用已有政策分析.....	1
2.1 动力电池的设计及生产.....	1
2.2 溯源编码及信息化平台建立.....	2
2.3 报废动力电池回收主体及责任.....	2
2.4 报废电池的收集、运输与贮存.....	3
2.5 梯级利用.....	4
2.6 再生利用.....	5
2.7 处罚措施.....	5
三、深圳市动力电池回收利用政策.....	6
3.1 深圳市动力电池回收利用现状.....	6
3.2 动力电池回收利用路线图.....	6
3.2 回收参与主体.....	8
3.3 回收流程.....	10
3.4 规范要求.....	11
3.5 废旧动力电池回收利用后可产生的效益.....	13
四、深圳市动力电池梯级利用政策分析.....	14
4.1 梯级利用技术可行性.....	15
4.2 梯级利用的主要市场.....	15
五、 深圳市动力电池回收利用政策建议.....	18
5.1 动力电池回收利用政策定位.....	18
5.2 建立溯源编码管理信息化平台.....	19
5.3 废旧动力电池收集.....	19
5.4 贮存运输要求.....	19
5.5 梯级利用.....	19
5.6 再生利用.....	19
5.7 支持相关技术与标准的研发.....	20
附件.....	21
A. 废旧动力电池污染分析.....	21
1. 原材料的提取.....	21

2. 电池生产.....	21
3. 电池本身污染.....	23
4. 湿法回收污染.....	24
B. 报废量预测.....	26
1. 中国混合动力汽车和纯电动汽车发展现状.....	26
2. 中国动力电池现状.....	28
3. 报废量预测.....	30
C. 已有政策罗列.....	37
D. 动力电池成本构成分析.....	41
1. 正极材料：.....	41
2. 负极材料.....	42
3. 电解液.....	43
4. 隔膜.....	44
5. 结构件、NMP、铜箔成本.....	44
6. 成本拆分汇总.....	45
7. 各类电池成本占比情况.....	47
E. 梯级利用可行方向与潜力.....	49
1. 梯级利用技术可行性.....	49
2. 梯级利用主要市场方向.....	50
F. 动力电池回收再生利用经济分析.....	51
1. 回收拆解技术发展现状.....	51
2. 回收拆解成本收益.....	53
参考文献.....	57

一、项目背景、意义

随着我国新能源汽车产业的发展，动力电池报废渐成规模。以锂离子电池为主的动力电池，报废后若不加以处理而直接进入环境，会对人体健康、水体和土壤造成严重的负面影响。动力电池回收利用研究有助于减少环境污染，促进资源综合利用和循环经济发展。为建立和完善动力电池回收利用体系，国家陆续出台了一系列关于动力电池回收利用的政策，深圳市也不断地进行探索，出台了一些地方的强制性和经济激励性政策，但是动力电池回收利用并未形成完善的、系统的政策体系。本项目的开展有助于推进深圳市动力电池回收利用体系建设，促进深圳市节能减排和资源再生利用工作，为其他地区及国家建立动力电池回收利用体系提供示范。

二、动力电池回收利用已有政策分析

从 2006 年开始，国家及地方有关部门陆续出台关于动力电池回收利用的政策以及相关的国家标准。随着新能源汽车产业的蓬勃发展以及国家对低碳节能减排和环境保护要求的不断加大，回收利用相关的政策与国家标准、行业标准不断细化，且整体数量逐渐增多，所涉及范围逐步扩大至汽车动力电池设计及生产、编码溯源、回收、运输与贮存、梯级利用、再生利用等诸多方面。

2.1 动力电池的设计及生产

2016 年国务院办公厅颁布的《生产者责任延伸制度推行方案》指出生产企业需考虑可回收性、可拆解性，优先使用再生原料、安全环保材料，深入开展产品生态设计。2017 年 8 月工信部出台了《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》，对电动汽车用动力蓄电池单体、模块和标准箱尺寸规格进行明确要求，对于不同类型的车型分别电池适用种类及具体尺寸参数进行详细规定。《规格尺寸》的提出，统一了动力电池尺寸规格，降低了动力电池的回收拆解难度。2018 年 1 月颁布的《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》（以下简称《回收利用管理暂行办法》）强调，生产企业采用标准化、通用性及易拆解的结构设计，对动力蓄电池固定部件进行可拆卸、易回收利用设计。材料尽可能使用可再生材料，有害物质符合国家相关标准。

2.2 溯源编码及信息化平台建设

2016年1月，国家发展改革委，工信部，环保部等发布的《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策》（2015年版）（以下简称《回收利用技术政策》）提出推动动力电池产品编码制度，由电池生产企业对电池进行编码以便信息得以追溯。2018年1月工信部出台的《回收利用管理暂行办法》指出工信部建立动力电池溯源信息管理系统、编码技术标准及相关信息共享机制；电池生产企业应按照国家统一编码标准要求对所生产动力蓄电池产品进行唯一性编码；汽车生产企业应在溯源信息系统中建立动力蓄电池编码与新能源汽车的对应关系，并委托新能源汽车销售商等通过溯源信息系统记录用户（产权方）溯源信息，告知用户在二手车交易等用户信息发生变更时，及时更新溯源信息的要求与程序；动力蓄电池维修更换机构、电池租赁等运营企业应在溯源信息系统中建立动力蓄电池编码与新能源汽车的动态联系；梯级利用企业要按照统一编码标准对梯级利用电池进行重新编码和加贴标识，准确记录废旧动力蓄电池来源、主要参数（类型、容量、产品编码等）、拆解检测、综合利用及产品流向等内容，建立废旧动力蓄电池综合利用数据库，并同时保留原动力电池产品的编码。《回收利用技术政策》指出，报废汽车回收拆解企业应当及时在“全国老旧汽车报废更新信息管理系统”中准确填报其拆卸回收的废旧动力蓄电池类型、数量、重量、去向等信息。2017年出台的《汽车动力电池编码规则》（GB/T34014-2017，发布时间2017-07-12，实施时间2018-02-01）标准明确该动力电池编码适用于汽车用动力电池的生产、销售、使用、维护、回收、梯级利用、再生利用等环节，确定了电池编码的基本原则、编码对象、代码结构以及数据载体。标准所规定的代码系统使电池信息确认的一致性和唯一性得以实现，为电池回收的开展提供了有力支撑。

2.3 报废动力电池回收主体及责任

《回收利用技术政策》规定，明确采用生产者责任延伸制度，电动汽车生产企业（含进口商，下同）承担电动汽车废旧动力蓄电池回收利用的主要责任，动力蓄电池生产企业（含进口商，下同）和梯级利用电池生产企业应分别承担各自生产使用的动力蓄电池回收利用的责任，报废汽车回收拆解企业应负责回收报废汽车上的动力蓄电池。而2018年1月工信部出台的《回收利用管理暂行办法》强调要落实生产者责任延伸制度，汽车生产企业将承担从生产、使用、利用、贮

存到运输过程中产生的所有废旧动力蓄电池的回收利用主体责任。《回收利用管理暂行办法》要求汽车生产企业应在本企业新能源汽车销售的行政区域（至少地级）内通过自建、共建、授权等方式建立回收服务网点，服务网点集中贮存废旧动力电池并移交再生利用企业；梯级利用企业应负责报废的梯级利用电池回收，通过多种形式，自建、共用废旧动力蓄电池回收利用网络，服务网点集中贮存废旧动力电池并交由综合利用企业处理。回收网点应符合当地城市规划及消防、环保、安全部门的有关规定，在营业场所显著位置标注提示性信息。同时要求建立动力蓄电池回收利用网点备案制度。《生产者责任延伸制度推行方案》也明确，地方政府将持续打击非法拆解电子产品，取缔非法回收站点。由此，电池回收市场逐步走向合法化正规化，从源头上具有可行性。

《回收利用管理暂行办法》指出工业和信息化部会同有关部门研究制定财税优惠、产业基金、积分管理等激励政策，鼓励汽车生产企业通过回购、以旧换新、给予补贴等措施，提高用户移交废旧动力蓄电池的积极性。目前，《深圳市新能源汽车发展工作方案》指出由整车制造企业负责新能源汽车动力电池强制回收，地方财政对企业给予资金补贴。在满足国家政策与地方政策接轨的情况下，要研究有效的废旧动力电池回收具体措施，对以旧换新、建立基金、押金、强制回收等各种方式都需进行评估，建立起有效的回收模式。同时，需从财税角度综合制定激励政策，制定动力电池回收再利用激励实施细则，建立更明确的赏罚机制。

为了明确汽车生产企业在动力电池回收体系中的主体地位以及需担责任，《回收利用管理办法》强调要落实生产者责任延伸制度，并首次明确对违反管理办法的汽车生产企业，工业和信息化部责令限期整改，若逾期未整改或整改未达标，将暂停其《道路机动车辆生产企业及产品公告》中新产品申报。同时也为违规的电池企业和综合利用企业明确了相应的罚则；同年发布的《生产者责任延伸制度推行方案》提出，电动汽车及动力电池生产企业应负责建立废旧电池回收网络，利用售后服务网络回收电池并统计信息，确保安全回收。对于失信的企业，方案中指出地方政府将对其采取联合惩戒措施。

2.4 报废电池的收集、运输与贮存

《回收利用管理暂行办法》提到，《废旧动力蓄电池的收集可参照《充电电池废料废件》（GB/T 26932-2011）等有关标准要求，按照材料类别和危险程度，

对废旧动力蓄电池进行分类收集和标识,并使用专用的器具包装以防有害物质渗漏和扩散。动力蓄电池的运输根据蓄电池具体的危险性大小以及《锂原电池和蓄电池在运输中的安全要求》(GB 21966-2008)进行运输。《废电池污染防治技术政策》提到,废锂离子电池运输前应采取预放电、独立包装等措施,防治因泄露造成的环境污染;国际民航组织(ICAO)发布的《危险货物航空安全运箱技术导则》和由国际航空运输协会(IATA)发布的《危险品规则》都对锂电池航空运输制定了规则。国际海事组织(IMO)发布的《国际海运危险货物规则》规定了锂电池的海运规则。《回收利用管理暂行办法》提到,废锂电池的贮存依照《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599-2001)等标准和政策进行执行。

2.5 梯级利用

《回收利用管理暂行办法》提出废旧动力蓄电池应开展多层次、多用途的合理利用,遵循先梯级利用后再生利用的原则,降低综合能耗,提高能源利用效率。梯级利用企业应符合《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》的相关规定,满足规模、装备和工艺等要求,并在每年第一季度结束前通过省级工业和信息化主管部门向工信部提交《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件执行情况和企业发展年度报告》。梯级利用企业应遵循国家相关技术规范及汽车生产企业提供的拆解技术信息,对符合要求的废旧动力蓄电池进行分类重组利用,按照国家统一编码标准对梯级利用电池进行编码和加贴标识。

2017年国家标准化管理委员会先后出台的《车用动力电池回收利用 拆解规范》以及《车用动力电池回收利用 余能检测》分别对电池回收拆解流程进行严格把控,以及对电池残值率进行科学界定。《拆解规范》对废旧动力电池回收利用的安全性、作业程序、存储和管理等方面进行严格要求。《余能检测》则对回收后的电池外观检查、电压判别、充放电电流判别、余能测试等检测流程进行规范,为新能源车电池二次使用提供评价依据,判断其流向梯级利用还是流向单体回收拆解,为电池充分利用奠定基础。

早在2012年7月,《节能与新能源汽车产业发展规划》便指出要建立动力电池梯级利用和回收管理体系。在《回收利用管理暂行办法》中,指出企业需对

梯级利用阶段的动力电池进行编码，建立回收系统。在梯级利用激励措施上，《回收利用技术政策(2015年版)》中指出，国家将在现有资金渠道内对梯级利用企业和再生利用企业的技术研发、设备进口等方面给予支持。对于梯级利用的方式，2017年《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》中提到，将梯级利用的动力电池引入大规模储能系统或基站等。

2.6 再生利用

再生利用企业为符合《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》的相关规定，对废旧动力蓄电池进行拆解、破碎、分离、提纯、冶炼等处理，实现资源再生利用和原材料回收利用等的企业。

再生利用企业应遵循国家相关技术规范要求，按照汽车生产企业提供的拆解技术信息规范拆解，开展再生利用；对废旧动力蓄电池再生利用后的其他不可利用残余物，依据国家环保法律法规、标准和技术规范等有关规定进行环保无害化处置。2016年12月环保部发布《废电池污染防治技术政策》。该《政策》完善了环境技术管理体系，指导污染防治，保障人体健康和生态安全，引导行业绿色循环低碳发展。主要包括废电池收集、运输、贮存、利用与处置过程的污染防治技术和鼓励研发的新技术等内容，为废电池的环境管理与污染防治提供技术指导。拆解流程符合《车用动力电池回收利用余能检测》以及《车用动力电池回收利用拆解规范》的相关标准、要求。2017年5月12日发布了《车用动力电池回收利用拆解规范》（GB/T 33598-2017），并且将从今年12月1日起正式实施，这是由工信部提出的国内首个关于动力电池回收利用的国家标准，规定了车用废旧动力蓄电池包（组）、模块拆解工作的术语和定义、总体要求、作业程序及存储和管理要求。

2.7 处罚措施

《回收利用管理暂行办法》规定，国内汽车生产企业违反相关规定的，由工业和信息化部责令限期整改，逾期未整改或整改未达标的将暂停其《道路机动车辆生产企业及产品公告》中新产品申报；违反有关规定的新能源汽车进口商，由有关监督部门予以处罚。国内电池生产企业违反相关规定，已列入《<汽车动力蓄电池行业规范条件>企业目录》的，由工业和信息化部责令限期整改，逾期未

整改或整改未达标的将撤销列入《〈汽车动力蓄电池行业规范条件〉企业目录》的资格；未列入的，工业和信息化部暂不受理《汽车动力蓄电池行业规范条件〉企业目录》申请。违反相关规定的动力蓄电池进口商，由有关监督部门予以处罚。

三、深圳市动力电池回收利用政策

3.1 深圳市动力电池回收利用现状

未来几年，新能源汽车动力电池将会迎来“报废潮”。深圳作为中国推广新能源汽车动力电池重点城市，未来几年，也将会面临动力电池大规模报废带来的处理处置的巨大压力。

(1) 目前，深圳市私家车报废下来的动力电池很少，有不少 2016 年前的电动出租车、电动公交大巴电池更换下来了。据我们了解，卸载下来旧电池的大部分还存储在电池生产厂家，厂家正在进行梯级利用探索，如用于移动充电车上，并没有大量流入回收利用企业。

(2) 虽然正规动力电池回收网络还没有完全建立，但废旧电池市场已经无形中形成，梯级利用、回收再生企业对报废电池有一定的需求，没有弃置电池危害环境的现象。

(3) 深圳市有五家有电子废弃物处理资质的环保企业，由于深圳市环境保护很严格，它们基本都是在外地设厂。同样，无资质的回收利用企业，在深圳没有生存空间，没有发现非法从事废旧动力电池回收的小作坊扰乱市场秩序、危害环境的现象。

目前来看，由于深圳市废旧动力电池报废高峰期还没有来临，梯次利用企业对报废的动力电池有一定的需求，加之深圳市环境保护执法的严格，并没有发现报废动力电池环境污染的事件发生，但随着报废高峰期临近，废旧动力电池市场需求端可能会发生变化，并不保证以后废旧电池回收再利用一定会有序运行，还需要对深圳市动力电池回收利用予以规范。

3.2 动力电池回收利用路线图

深圳市动力电池回收利用政策要与国家相关政策保持一致，要与《中华人民共和国道路交通安全法》等上位法协调；动力电池回收机制要与新能源汽车补贴政策结合，不必采取其它经济激励措施；动力电池回收政策，主要依靠信息化手

段，辅助以行业管理规范，约束相关责任主体行为，慎用强制手段，如确实必要，也仅针对相关企业采用，不对消费者进行强制性约束。

参考美国、日本等发达国家废旧电池、新能源汽车动力电池回收再利用的成功模式，并结合中国的实际情况，以新能源汽车动力电池回收及再利用产业中的物质流向为线索，构建了“生产者责任延伸制度下深圳市新能源汽车动力电池回收利用模式”。

电池回收利用采用“先梯级利用后再生利用”的原则，对于轻度报废电池（电池性能下降到原性能的 50%~80%），经过筛分、拆解、重组后贴上梯级利用标签，可再用于储能系统、路灯、UPS 电源、低速电动车等领域。重度报废电池（电池性能下降到原性能的 50%以下）通过拆解再生，回收其中的电极材料，尤其是钴（Co）、镍（Ni）、锂（Li）等贵金属。

该回收利用模式在运行中所涉及各个环节如图 3.1。

动力电池生产企业生产动力电池，供给新能源汽车生产企业，企业将新能源汽车卖给用户，用户在使用中，若电池发生故障或者失效报废，交由 4S 店、汽车定点维修店；动力电池置换必须强制执行以旧换新，依靠动力电池信息系统约束动力电池生产厂家和新能源汽车厂家，对不执行以旧换新的企业，实行市场禁入。报废汽车拆解企业要与汽车生产企业、动力电池生产企业、回收利用企业建立合作网络。报废汽车车主自主选择上述合作网络中的车企、电池企业或回收利用企业，在报废汽车拆解企业监督下，进行废旧动力电池拆卸。废旧电池拆卸后进入回收网络，并更新动力电池信息。

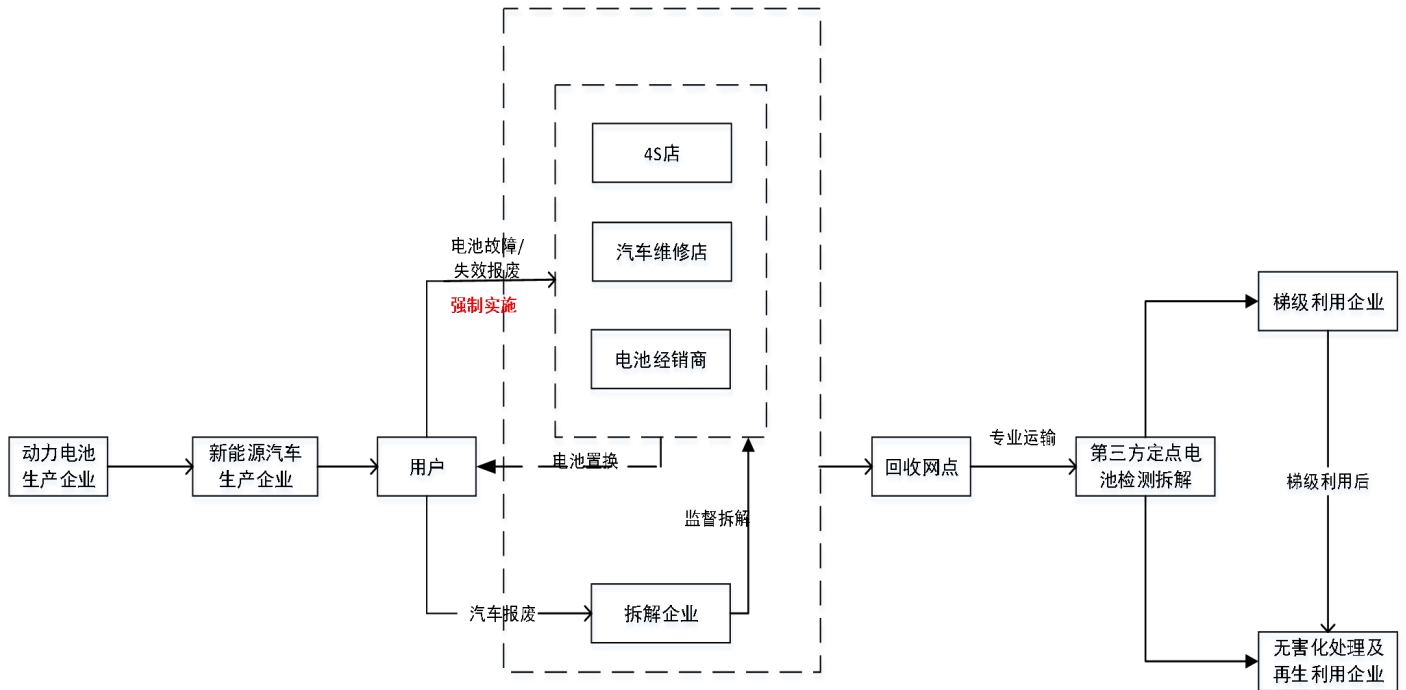


图 3-1 深圳市动力电池回收利用模式

若新能源汽车达到使用年限进行报废，则将报废汽车送至报废汽车回收拆解企业，报废汽车回收拆解企业收集报废动力电池。4S 店、汽车维修店、电池经销商和拆解企业将收集的电池交到相应汽车企业设立的回收网点，回收网点收集一定数量的废旧动力电池后，专业运输公司将各回收网点收集的废旧动力电池按危险货物集中运输至汽车生产企业或与汽车生产企业合作的第三方设立的拆解工厂。拆解厂根据动力电池的特性进行下一步的处理，优先进行梯级利用，无法梯级利用的电池则对其进行无害化处理后再生利用。

3.2 回收参与主体

在制定回收动力电池的流程时，需要考虑新能源汽车的运营方式、能源供给方式等因素，其主要涉及以下主体：

(1) 新能源汽车生产企业。新能源汽车生产企业是动力电池正向物流中的关键环节，通过新能源汽车的销售网络实现动力电池的最终消费。在生产者责任延伸制度下，因新能源汽车生产商直接面对消费者，其要承担回收废旧动力电池的主要责任。在深圳市销售新能源汽车的企业，要利用其销售网络设立废旧动力电池回收网点。

(2) 动力电池生产企业。动力电池生产企业主要包括国内动力电池生产商和国外动力电池进口代理商。动力电池生产企业是动力电池产生的源头，要积极履行废旧动力电池回收的责任。

(3) 新能源汽车经销商。经销商包括销售新能源汽车的企业、4S 店等，其构成了新能源汽车生产商下游的销售网络。新能源汽车经销商众多，分布在全国各地直接与消费者联系，可以在此设回收网点，进行动力电池的回收。因此，新能源汽车的销售网络可以改造为动力电池的回收网络。

(4) 消费者。消费者主要包括个人客户和集团客户，集团客户主要包括大中型企业、学校、园区等单位。消费者是产品的最终使用者，是废旧动力电池产生的直接原因，其处置废旧动力电池的行为会对环境产生影响。如果弃之不管，会直接造成环境污染。通过经济手段（押金制或以旧换新制度）或者强制规定，促使或约束消费者将废旧动力电池在正规回收网络回收，从源头遏制动力电池流向非法回收小作坊，有助于实现动力电池的循环再利用。但是，需要注意的是，对新能源汽车用户征收动力电池押金，存在资金谁来管理、怎么使用等诸多问题，并容易造成潜在新能源汽车用户的心理抵触，这与国家整体激励购买新能源车的政策导向相违背。强制回收规定，也存在法律法规障碍。因此建议动力电池更换必须采用以旧换新，并从汽车报废拆解、梯级利用、回收再生等环节，对消费者进行约束或者激励。

(5) 梯级利用企业。电池梯级利用是从环境保护和经济效益出发，延长锂电池使用寿命，在动力电池组外观完好、没有破损、各功能元件有效的情况下，将其用在储能设备、电信基站、太阳能路灯、低速电动车等领域。进行梯级利用的企业必须要在政府进行备案，需有相应的检测设备、检测场地及拆卸技术，并接受政府环境管制。

(6) 回收处理企业。废旧动力电池回收处理工艺复杂，需要采用机械法、火法、湿法等方法进行贵金属等材料的回收，且在处理过程中面临着放电、化学腐蚀、环境污染等问题。进行废旧动力电池资源回收及无害化处理的企业必须获得相应的经营许可，并接受政府环境管制。

3.3 回收流程

新能源汽车生产企业、动力电池生产企业是动力电池销售流程中的主体企业。从欧美发达国家的电池回收经验可以看出，在建立废旧电池的回收体系时，新能源汽车生产企业承担废旧动力电池回收的主要责任，在回收动力电池的过程中，动力电池生产企业、回收处理企业要配合其回收工作。

回收的流程大致如下：

(1)动力电池生产企业生产的电池销售给新能源汽车生产企业以及汽车维修店、电池经销商等机构；

(2)新能源汽车生产企业将带有动力电池的新能源汽车销售给消费者；

(3)消费者在使用新能源汽车的过程中，动力电池发生故障或者失效报废，通过 4S 店、汽车定点维修店、电池经销商处更换新电池，4S 店、汽车维修店、电池经销商收集报废动力电池；

(4)新能源汽车达到报废标准后，消费者将报废汽车送至报废汽车回收拆解企业，报废汽车回收拆解企业收集报废动力电池；

(5)4S 店、汽车维修店及电池经销商收集一定规模的废旧动力电池后，通知相关的汽车生产企业设立的回收网点进行终极回收；

(6)汽车生产企业通知专业运输公司，专业运输公司将各回收网点收集的废旧动力电池集中运输至汽车生产企业或与汽车生产企业合作的第三方设立的拆解工厂；

(7)拆解工厂对成规模的废旧动力电池进行专业、科学的检测，对于电池性能下降到原性能的 50%~80%的，将电池进行梯级利用；对于电池性能下降到原性能的 50%以下的，将电池组拆解为电极、金属、树脂等不同类型的废旧资源；

(8)梯级利用的电池送往下一生产企业进行生产、加工，生产储能设备或者用于低速电动车等，再次出售；

(9)拆解工厂与资源化利用企业进行废旧资源的交易，各资源化利用企业对废旧资源进行高效、环保的资源循环利用，加工成再生产品，资源化利用企业将再生镍、钴等产品出售给动力电池生产企业，成为其生产电池的原材料。

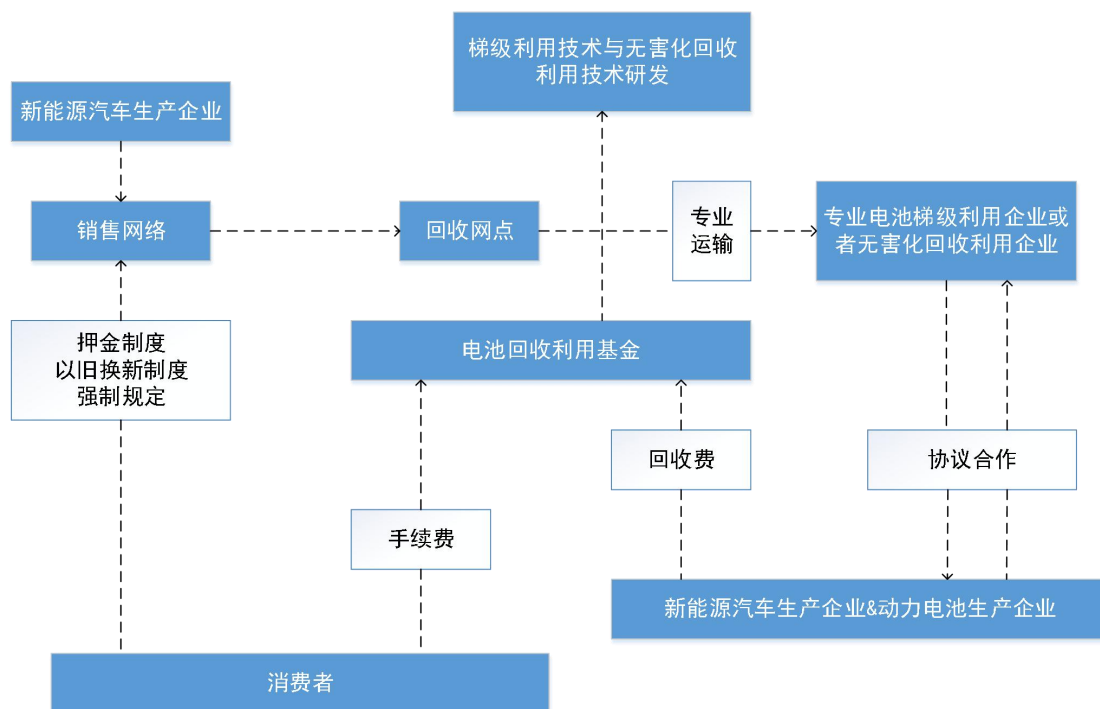


图 3-2 深圳市动力电池回收利用流程

3.4 规范要求

(1) 生产、设计标准

动力电池生产企业及动力电池产品需满足《锂电池行业规范条件》（工业和信息化部 2015 年第 57 号）及《汽车动力蓄电池行业规范条件》（工业和信息化部 2015 年第 22 号）相关要求。动力电池产品符合《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》（GB/T 34013-2017）标准。

(2) 溯源编码、信息化平台

深圳市建立动力电池信息化监管平台。电池生产企业按《汽车动力电池编码规则》（GB/T34014-2017）对电池进行唯一性编码，并将电池初始信息记录于动力电池信息化管理平台；汽车生产企业在信息平台中建立新能源汽车与动力电池编码的对应关系；新能源汽车销售商、动力蓄电池维修更换机构、电池租赁等运营企业在信息溯源平台中对相关信息变动进行变动登记。梯级利用企业要按照编码规则对梯级利用电池进行重新编码并保留原编码；再生利用企业及汽车报废厂对动力电池进行注销申请、处理信息登记。

(3) 废旧动力电池收集

a) 责任主体：电动汽车生产企业（含进口商，下同）承担电动汽车废旧动力电池回收利用责任，与报废汽车拆解企业共同负责回收报废汽车上的动力电池；梯级利用电池生产企业承担梯级利用电池的回收利用责任。新能源汽车动力电池更换必须严格执行以旧换新，换下的废旧电池通过汽车生产厂家渠道进入回收收集环节。

b) 回收网点：汽车生产企业、梯级利用企业应通过自建、共建、授权等方式建立回收服务网点，回收网点应进行备案。

回收网点资质要求：回收机构应满足以下资质（下列条件之一）：电动汽车生产企业指定（或授权）的电动汽车售后服务商或其他机构；动力电池生产企业指定（或授权）的电池销售商、动力电池换电（或租赁）企业或其他机构；梯级利用企业或其指定（或授权）机构；具备动力电池拆卸所需技术、设备、人员等相应条件的报废汽车回收拆解企业。建立动力电池回收利用网点备案制度，回收网点应符合当地城市管理、消防、环保、安监部门的有关规定，在营业场所显著位置标注提示性信息。

c) 收集标准：废旧动力电池的收集参照《充电电池废料废件》（GB/T 26932-2011）标准。

（4）运输、贮存

废旧动力电池的运输参照《锂离子电池和蓄电池在运输中的安全要求》（GB 21966-2008）的安全要求和检验标准；报废电池运输前应采取预放电、独立包装等措施，防治因泄露造成的环境污染。废旧动力电池的贮存参照《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB 18599-2001）等标准。

同时特别提出的是，锂电池虽未纳入危险废弃物进行管理，但其具有漏电、起火、爆炸等潜在的风险，应该对其运输、贮存的安全性给予高度重视。建议将其纳入危险品的运输和贮存管理范围，不宜单独制定废旧汽车动力电池的运输和存储标准。

（5）梯级利用

梯级利用企业应符合《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件》（中华人民共和国工业和信息化部公告 2016 年第 6 号）和《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》（中华人民共和国工业和信息化部

部公告 2016 年第 6 号) 的相关规定。对回收的报废动力电池拆解流程按《车用动力电池回收利用 余能检测》(GB/T 34015-2017) 以及《车用动力电池回收利用 拆解规范》(GB/T 33598-2017) 相关要求执行。

对符合要求的废旧动力蓄电池进行分类重组利用, 按照国家统一编码标准对梯级利用电池进行编码和加贴标识。

综合利用企业违反相关规定的, 按照《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》(中华人民共和国工业和信息化部公告 2016 年第 6 号) 和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》(中华人民共和国工业和信息化部公告 2016 年第 6 号) 的相关规定与要求执行。

加强对梯级利用企业的管理规范, 建立梯级利用电池产品生产企业备案登记制度。梯级利用企业有责任对其生产的再利用电池产品进行回收, 消费者将购买的产品返还到梯级利用企业, 由梯级利用企业送回再生利用企业对电池拆解再生利用。

梯次利用产品按照《锂离子电池行业规范条件》(工业和信息化部 2015 年第 57 号) 要求, 对于消费类、动力型、储能型三类电池局要求容量保持率为 80%。

(6) 再生利用

再生利用企业应符合《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》(中华人民共和国工业和信息化部公告 2016 年第 6 号) 的相关规定。拆解流程按《废电池污染防治技术政策》(环境保护部公告 2016 年第 82 号)、《车用动力电池回收利用 余能检测》(GB/T 34015-2017) 以及《车用动力电池回收利用 拆解规范》(GB/T 33598-2017) 相关要求执行。对废旧动力蓄电池再生利用后的其他不可利用残余物, 依据国家环保法律法规、标准和技术规范等有关规定进行环保无害化处置。

3.5 废旧动力电池回收利用后可产生的效益

(1) 经济效益

目前, 动力锂电池中含有钴、镍、锂等具有回收价值的金属, 且数量可观的, 废旧动力电池的回收收益主要来自动力电池中有价值的金属。按照回收率和金属价格测算, 目前磷酸铁锂和三元锂电池的回收收益为分别为 10578.81 元/吨和

36765.38 元/吨。废旧动力电池回收成本分为两个部分：可变成本（ C_U ）和固定成本（ C_D ）。动力电池的可变成本和固定成本与动力电池处理量、回收技术水平、地理位置等都很多因素都有关系。由于中国电动汽车动力电池还未达到批量报废的阶段，现阶段，许多动力电池回收处理单位收集不到足量的废旧电池包，导致目前国内还没有正规的规模化的动力电池回收处理企业在稳定运行，本报告参考文献中的理论分析和实验室推测的数据，得到磷酸铁锂电池处理成本为 7176 元/吨、三元锂电池处理成本为 19194 元/吨。因此，在动力电池回收处理设备满负荷的情况下，磷酸铁锂电池和三元锂电池回收处理都是盈利的，磷酸铁锂盈利为 3394 元/吨，三元电池盈利为 17571 元/吨。

由于目前我国动力电池未达到批次报废的等级，许多动力电池回收处理商无法回收到足量的废旧动力电池包运营动力电池回收处理设备，所以，在现阶段，动力电池回收处理企业的固定成本会较高，难以盈利。但随着动力电池规模化报废，且动力电池回收渠道正规化、合理化，动力电池回收处理企业将能够在动力电池回收板块中获取相应的利润。

（2）环境效益

动力电池可能会出现没有进入到回收利用系统而是跟生活垃圾一起被填埋处理的情况。由于动力电池中含有重金属以及有毒的电解液等对环境有严重危害的物质，如果对其直接填埋，这些有毒有害物质可能会进入到土壤中导致土壤酸碱化，从而危害土壤生态环境以及人类健康。根据对贵屿镇的环境影响的经济评估报告中显示，每一吨的磷酸铁锂电池的环境效益是 2376 元（An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China）。

综上所述，做好动力电池回收利用工作不仅仅可以保护环境，而且能够带来可观的经济效益。

四、深圳市动力电池梯级利用政策分析

虽动力电池梯级利用在技术上目前仍存在一定的障碍，但随我国在该领域法律法规的逐步完善、技术的研发跟进与动力电池材料尺寸等标准的不断规范，现有的障碍有可能被突破。

4.1 梯级利用技术可行性

对于梯级利用技术方面，目前主要面临的重难点为筛选、分档和拆解。在对动力电池进行重新组合时，如何进行简单、可靠的普适性分选是首先要面临的问题。因为与新电池相比，回收的动力电池一致性较差，而单体电池之间的性能不一致，将严重影响电池组的性能发挥。目前常见的筛选方法是采集单体电池容量、电压及内阻作为基础数据，然后进行相应的筛选、分档和配组。但即便如此，重组过后动力电池的一致性仍存在高低之分。如何降低报废的动力电池进行梯级利用时性能不一致的影响，提高筛选精度，一直都是研究的重点和难点。目前国内外已有一定量的文献在减少不一致性上提出了建议。

另一个关键技术难点是动力电池的拆解问题。废旧动力电池，尤其是锂电池，在拆解过程中，操作不当很可能引发电池的自燃甚至爆炸。此外，国内生产的动力锂电池差异较大，意味着不可能用一套拆解流水线适合所有的动力电池，故目前国内报废的动力电池主要仍依靠人工进行拆解。这不仅提高了梯级利用的技术难度，也提高了再次利用的成本。《车用动力电池回收利用拆解规范》和《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》的发布，将为报废动力电池的进行规模化的流水线式拆解作业提供有利的条件，在一定程度上会解决行业性的发展难题。

4.2 梯级利用的主要市场

报废后的动力电池进行梯级利用大致可分为以下三类：第一类为整包级别梯级利用，主要用于通信基站、电网储能等；第二类为模组级别梯级利用，主要用于电动三轮车、电动摩托车等；此外，还有部分拆解的单体电池直接用于信息家电（3C）消费等领域，如移动电源、车载冰箱等。

整包级别梯级利用。目前国内外进行动力电池整包级别梯级利用的主要目标市场均为储能市场。锂离子动力电池容量大、密度高、效率高，非常适合用于储能系统的运行，此外，梯级利用的电池还可以显著降低锂电池用在储能领域的成本。仅就储能领域而言，目前在大规模可再生能源并网、辅助服务、电力输配、用户侧等储能应用领域都已经有了梯级利用示范项目在运行，项目涉及千瓦级的户用储能产品，十千瓦至百千瓦级的光储微网、电动汽车充电站储能系统、数据中心备用电源，以及兆瓦级大型储能电站等。目前来讲，通信储能被认为最适合接纳退役动力电池。通信基站的电池主要起备用效果，通信基站一般通过电网系统

供电，但需要配置后备电池，以保证在停电期间持续稳定运行，因此对电池的循环次数等性能要求不高。铅酸电池原是通信基站备电的主流，但随着锂电池成本的不断下降，这种能量密度更高、寿命更长、环境污染相对较小的电池正变得更具竞争力，而梯级利用的锂电池则有望进一步降低成本。因此报废动力电池只要成本优于铅酸电池，即可满足用于通信基站的要求。我国的通信基站大概有 300 万个，一辆电动汽车的电池基本可以满足一个通信基站的需要。此外，根据《中国能源展望 2030》，到 2020 年时，全国在风力发电装机容量有望实现 2.5 亿千瓦，光伏发电装机容量将达到 1.6 亿千瓦。可再生能源发电配备储能系统，已经成为一种刚性需求，锂离子动力电池在储能市场前景广阔。

模组级别梯级利用。低速电车与电动汽车具有相似的车身构造和技术特征，因此在产业链的大多数环节都是可以共用的。因其兼具便宜、低耗能低排碳、停车便利性、诉求日常代步或短程搬运需求，在农村与中小型城镇的市场广阔。2015 年低速电动车销量增长 50%，达到 60 多万辆，呈现出井喷式发展势头。但现有的低速电动车一般采用对环境危害大、性能相对差的铅酸蓄电池，这也成为制约低速电车发展的一个重要因素。低速电动车想要转正，得到持续发展，必然将面临着产业升级。目前来讲，低速电动车对续航里程要求相对普通电动车门槛较低，而大部分普通电动车续航里程均在 150 公里以上，普通电动车动力电池能量低于 80% 就无法继续使用。若梯级利用电池一致性的问题可以得到很好的解决，则在低速电车上采用梯级利用的动力锂电池，不仅可以帮助低速电动车企业进行产业升级，还可以保持其具有竞争力的低成本与低售价。因此，低速电动车的“合规化”、“锂电化”或将为普通电动车动力电池梯级利用带来新的方向。

表 4.1 国内外梯级利用动力电池储能的典型应用案例

性质	所在地	应用领域	参与主体	应用情况
商业运作	日本	家庭和 商业储能	4R Energy 公司(日产汽车与住友集团合资成立)	将日产 Leaf 汽车的二手电池用于住宅和商用的储能设备
	日本和美国	家庭储能	美国 EnerDel 公司、日本伊藤忠商事	在部分新建公寓中推广梯级利用电池
	美国	移动电源/小型商用	美国 FreeWire 公司	将 Nissan 退役电池用于电动汽车充电宝产品 MobiCharger，并面向写字楼等工作区域使用

示范工程	德国	电网储能	TUV 南德意志集团	由德国能源与气候研究机构的资金支持，在柏林开展电池体积利用储能的项目研究和应用示范工程
	德国	电网储能	博世集团、宝马（提供电池）、瓦腾福公司（运维）	博世集团利用宝马 ActiveE 和 i3 纯电动汽车的退役电池，在柏林建造 2MW/2MWh 的大型光伏电站储能系统
	中国北京	商业储能	中国电科院、国网北京市电力公司、北京交通大学	大兴电动出租车充电站“梯次利用电池储能系统示范工程”，容量为 100 kWh，用于调节变压器功率输出、稳定节点电压水平，可离网运行
	中国河北唐山	电网储能	国网冀北电力有限公司唐山供电公司、北京交通大学	曹妃甸“梯次利用电池储能系统示范工程”，容量为 25kW/100kWh，用于调节变压器功率输出、稳定节点电压水平、移峰填谷，并保证用户供电可靠性和电能质量，可离网运行
	中国北京	低速电动车/电网储能	国网北京市电力公司、北京工业大学、北京普莱德新能源电池科技有限公司	北汽新能源汽车产业基地“汽车动力电池系统梯次利用及回收示范线”，利用退役的动力电池，在电动场地车、电动叉车和电力变电站直流系统上进行改装示范
	中国北京	电网储能	北京电力公司与北京交通大学	“动力电池梯次利用技术与示范应用”，应用奥运充电站的退运动力电池，设计储能示范系统能量共计 240kWh
	中国河南郑州	电网储能	国网河南电力公司、南瑞集团	郑州市尖山真型输电线路试验基地“退役电池储能示范工程”，国内首个真正意义的基于退役动力电池的混合微电网系统，由多晶硅光伏发电系统、风力发电系统、退役电池储能双向变流器以及退役电池储能系统组成的风光储混合微电网工程
项目研究	美国	综合研究	美国 Sandia 国家实验室	针对车用淘汰电池的二次利用研究，主要针对电池梯级利用的领域、经济性、示范规模等的初步研究
	美国	分布式发电/微网	美国可再生能源国家实验室	针对电动汽车锂电池二次利用的研究，提出淘汰电池可用于风力发电、光伏电池、边远地区独立电源等
	美国	经济效益	加州大学戴维斯分校混合电动汽车研究中心	对动力锂电池的二次利用和价值分析等方面进行了研究
	美国	经济效益	西北太平洋国家实验室	研究了动力电池在电网系统中二次利用的经济效益问题
	美国和瑞典	智能电网	美国通用、瑞典 ABB	开展了车载锂电池再利用的调查与研究，如用来存储太阳能电池系统和风力发电系统等所产生的电力

美国和日本	技术/商业可行性	Duke 能源、ITOCHU 公司	合作进行电池二次利用的评价和测试，将旧电池用于家用能源补充、可再生能源存储，探讨技术可行性和商业可行性
中国广东深圳	技术/商业可行性	深圳市比克电池有限公司	深圳市比克电池有限公司“废旧新能源汽车拆解及回收再利用项目”，引进动力电池再利用生产线，将动力电池运用于储能、供电基站、路灯、电动工具及低速电动车、风能 / 太阳能发电储能领域

五、深圳市动力电池回收利用政策建议

动力电池报废量渐成规模，回收和再利用成为当务之急。得益于国家政策的强力支持，我国新能源汽车近几年来呈现“井喷”式的发展态势，动力电池报废量也随之渐成规模。本研究综合考虑补贴因素变化，电动汽车车型占比、报废年限，不同类型动力电池的续航里程、循环次数，推测到 2020 年动力电池报废量约达 30 万吨，到 2025 年报废量达 130 多万吨。解决如何处置报废动力电池的问题已是当务之急。

不同种类的动力电池回收价值不同，应当采取差异化回收政策。对于三元系电池，由于贵金属钴价格持续坚挺，报废三元电池的市场回收价格通常在 15000 元到 30000 元每吨，仅靠市场自身就可以完成回收再利用。从现阶段锂矿价格来看，报废的磷酸铁锂电池也具有贵金属回收价值，但不排除如果锂相关产品价格持续调整，回收磷酸铁锂电池将会变得无利可图的情况发生。

梯级利用具有可行性。报废后的动力电池可用于通信基站、电网储能、家庭商业储能、移动电源、低速电动车等领域，制约大规模梯级利用的主要因素是电池残余容量无损快速检测技术发展与废旧动力电池残余容量不一致。综合考虑以上结论，提出深圳市动力电池回收利用政策如下：

5.1 动力电池回收利用政策定位

深圳市动力电池回收利用政策要与国家相关政策保持一致，要与《中华人民共和国道路交通安全法》等上位法协调；动力电池回收机制要与新能源汽车补贴政策结合，不必采取其它经济激励措施；动力电池回收政策，主要依靠信息化手段，辅助以行业管理规范，约束相关责任主体行为，慎用强制手段，如确实必要，也仅针对相关企业采用，不对消费者进行强制性约束。

5.2 建立溯源编码管理信息化平台

建立深圳市动力电池信息化监管平台。电池生产企业按《汽车动力电池编码规则》（GB/T34014-2017）对电池进行唯一性编码，并将电池初始信息记录于动力电池信息化管理平台。汽车生产企业在信息平台中建立新能源汽车与动力电池编码的对应关系。新能源汽车销售商、动力蓄电池维修更换机构、电池租赁等运营企业在信息溯源平台中对相关信息变动进行变动登记。梯级利用企业要按照编码规则对梯级利用电池进行重新编码并保留原编码。再生利用企业及汽车报废厂对动力电池进行注销申请和处理信息登记。

5.3 废旧动力电池收集

汽车生产企业或者进口车经销商承担动力蓄电池回收利用主体责任。动力电池置换必须强制执行以旧换新，依靠动力电池信息系统约束动力电池生产厂家和新能源汽车厂家，对不执行以旧换新的企业，实行市场禁入。报废汽车拆解企业要与汽车生产企业、动力电池生产企业、回收利用企业建立合作网络。报废汽车车主自主选择上述合作网络中的车企、电池企业或回收利用企业，在报废汽车拆解企业监督下，进行废旧动力电池拆卸。废旧电池拆卸后进入回收网络，并更新动力电池信息。

5.4 贮存运输要求

废旧动力电池贮存运输要保证安全性，按危险货物管理。

5.5 梯级利用

加强对梯级利用企业的规范管理，设立梯级利用电池产品生产企业登记备案制度。梯级利用企业有责任对其生产的再利用电池产品进行回收。梯次利用产品的消费者将购买的产品返还到梯级利用企业，由梯级利用企业送回再生利用企业对电池进行拆解再生利用。

5.6 再生利用

再生利用企业应符合《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》（工信部公告 2016 年第 6 号）和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法》（工信部公告 2016 年第 6 号）的相关规定。拆解流程按《废电池污染防治技术政策》（环发〔2003〕163 号）、《车用动力电池

回收利用 余能检测》（GB/T 34015-2017）以及《车用动力电池回收利用 拆解规范》（GB/T 33598-2017）相关要求执行。严格遵守环保法律法规、标准和技术规范。

5.7 支持相关技术与标准的研发

支持快速检测技术与标准的研发，规范梯级利用企业检测步骤。对于报废后可进行梯级利用的动力电池，需出台一套快速检测标准。目前市场上梯级利用回收厂家对于报废电池一致性的检测内容各异，有些只是简单的测量内阻、电压以及最大可用容量，并无法有效保证重组电池包的一致性。快速检测标准的出台可为梯级利用企业对电池一致性的检测提供评价依据，并在一定程度上保证企业所生产的重组电池包的质量。

加大对提高梯级利用动力电池一致性技术的研发支持，提高梯级利用电池一致性。政府需加大对于提高梯级利用动力电池一致性的技术研发的支持，该项可分为生产环节与梯级利用环节两部分。对于生产环节，进一步规范电池规格尺寸，增强动力电池企业生产过程的自动化水平。在梯级利用环节，鼓励企业进行提高重组电池包一致性的技术研发。

附件

A. 废旧动力电池污染分析

汽车用动力电池由以下几个部分组成：正极、负极、隔膜和电解液。具有能通过电解质离子的微孔的隔膜由聚合物材料构成，负责将分隔开电池的正负极，防止两极接触而短路；电解液主要由特定有机溶剂和溶解在其中的锂盐组成，作为蓄电池充放电反应中离子传输的载体。正极活性材料是由锂的金属化合物（如钴酸锂、磷酸铁锂和三元系材料等）组成，负极活性材料由碳材料（如石墨等）组成。从电池的原材料制备，到电池的生产和组装，再到电池的回收利用，均会涉及到环境污染物的排放。

1. 原材料的提取

(1) 金属锂的提取

熔盐电解法：以氯化锂为原料，生产过程中在阳极析出氯气，氯气对环境的污染严重。

(2) 金属镍的提取

电解法：含镍钴硫化矿冶炼，生产过程中产生的废气中含有大量的二氧化硫和含氯废气。

尾矿水中除含有少量的 Ni、Cu、Co、Fe 等重金属离子外，还含有大量的 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等有害元素，对地下水造成严重污染。

2. 电池生产

(1) 烘干废气

原辅料在涂布完成后进入烘干工序，湿极片经过电热箱干燥过程中，浆料中添加的 NMP 全部蒸发出来，产生烘干废气，主要含的污染物为 NMP 和少量粉尘。NMP 易燃易爆，加热形成气态后排放到大气中时对人体有伤害，具有微毒性。

(2) 刷片废气

极片裁切完后要对极片表面进行刷片，以去除毛刺，刷片过程将产生刷片废气，主要成分为粉尘。

(3) 注液废气

注液过程电解液和空气中的水分反应会产生 HF。废气中的主要污染物为 HF。

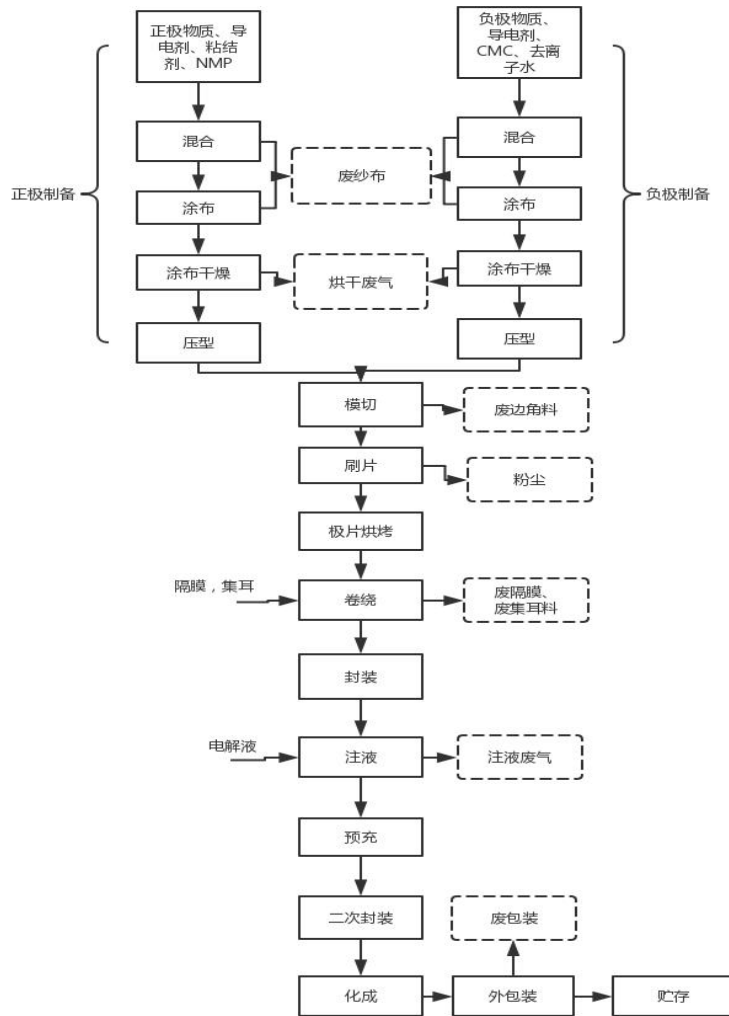


图 A-1.锂离子电池主要生产流程图

(4) 固体废弃物

锂电池生产项目主要固体废物包括废纱布、裁片边角料、极耳废料、废隔膜、废包装材料、废原料包装、废树脂、废电池、污泥和生活垃圾。

表 A-1.锂离子电池生产流程主要污染

名称	组成及特性	类别	产生环节
废纱布	极片原料	危险废物	配料、涂片
裁片边角料	原料、铜、铝	一般废物	裁片工序
极耳废料	铜、铝	一般废物	装配车间
废隔膜	隔膜	一般废物	装配车间
废包装	纸质包装、塑料等	一般废物	包装车间
废原料包装	原料桶、塑料包装等	危险废物	原料车间
废弃树脂	废弃树脂	危险废物	纯化水车间
废电池	/	危险废物	检验车间

3. 电池本身污染

表 A-2.锂离子电池主要污染

材料种类	材料名称	化学性质	潜在危害
正极材料	钴酸锂	与水、酸或氧化剂发生强烈反应。燃烧或受热分解产生有毒的锂、钴氧化物	重金属钴污染、使环境 pH 升高。
	锰酸锂	与有机溶剂以及还原剂或者强氧化剂（双氧水、高氯酸等）都能反应，产生有毒物质	重金属锰污染、使环境 pH 升高。
	镍钴锰酸锂	与水、酸或者强氧化剂反应，受热分解产生有毒的锂、钴、镍等氧化物	重金属镍、钴、锰污染，使环境 pH 值升高
负极	石墨	燃烧产生 CO、CO ₂	粉尘污染
电解液	LiPF ₆	强腐蚀性，遇水分解产生 HF，与强氧化剂发生反应，燃烧产生 P2O ₅ 等	氟污染
有机溶剂	碳酸乙烯酯	与酸、碱、强氧化剂、还原剂发生反应，水解产物产生醛和酸，燃烧可产生 CO、CO ₂ 。	醛、有机酸污染
	碳酸丙烯酯	与水、空气、强氧化剂反应，燃烧产生 CO、CO ₂ ，受热分解会产生醛和酮等有害气体，引燃可引起爆炸	醛、酮有机物污染
	二甲基碳酸酯	与水、强氧化剂、强酸、强碱和强还原物质发生剧烈反应，水解可生成甲醇，燃烧产生 CO、CO ₂ 。	甲醇等有机物污染
	二乙基碳酸酯	与水、强氧化剂、强酸、强碱和强还原物质发生剧烈反应，燃烧产生 CO、CO ₂ 。	醇等有机物污染

4. 湿法回收污染

(1) 回收预处理污染

a) 预放电

废旧锂离子电池中含有部分残留电量,在进行破碎及后续回收处理前应先将废旧锂离子进行预放电处理,否则残留的电量极有可能在拆解及破碎过程中集中释放,同时将伴随着热量的释放,严重时将有可能会引发爆炸。放电的方式有:使用导电盐溶液、酸溶液、盐溶液短路放电等。

由于锂离子电池的外壳多为金属或合金外壳,放电溶液中高浓度的酸碱或盐溶液易造成电池外壳的腐蚀,从而破坏电池的电芯结构,而且电池内部金属可能会浸到放电溶液中,造成有价金属损失和废液金属污染。

b) 机械破碎

通过多级破碎去除锂电池外壳,使塑料或铁屑在重力或磁力的作用下分离,实现电极材料富集。

机械破碎过程中可能产生粉尘、噪音和热污染。电解质和溶剂中含有碳酸丙烯酯(PC)、碳酸二乙酯(DEC)和其他有机成分(比如苯、甲苯和二甲苯)。这些挥发性有机物的持续释放存在潜在污染,长期暴露于这些污染物,可能导致严重的神经官能症和心脏疾病。

c) 热处理

正极集流体与活性物之间有粘合剂 PVDF,可以将温度加至 380~400℃,使得 PVDF 分解,正极活性物质从集流体上脱落。可以在热处理情况下加入添加剂获得含有价金属的产品,较好的回收金属。可以添加 KHNO_3 、 Fe_2O_3 等。

然而,在高温条件下,添加剂和有机粘结剂将会生成有害气体,带来严重的大气污染。

d) 碱液溶解法

由于正极活性物质钴酸锂、负极材料石墨和负极集流体铜箔均不与碱发生反应,因此采用 NaOH 碱性溶液从废旧锂离子电池的正极集流体中溶解浸出 Al 及其表面起保护作用的 Al_2O_3 ,实现集流体铝箔的去除和电极材料的富集。

碱处理反应中,会产生大量 H_2 ,NaOH 溶液会随之飘散到操作环境中,威胁操作人员健康。

e) 溶剂溶解法

利用有机溶剂溶解正极材料的粘结剂聚偏氟乙烯（PVDF），从而实现电极材料与集流体的分离，从而得到 Al 箔、Cu 箔等。所用的有机溶剂有 N-甲基吡咯烷酮（NMP）等。

然而，所使用的有机溶剂一般有毒且容易挥发，威胁操作人员健康。

f) 手工拆解

以人工的方法代替物理、化学、机械方法，使得对所回收的材料有较高的识别率。然而，拆解过程若电池残余电量过大会爆炸的危险，电池中电解质、粘结剂等添加剂的挥发和泄露都对手工拆解人员的人身安全有潜在危害。

(2) 浸出过程污染

a) 无机酸浸出

使用无机酸对废旧锂离子电池中的金属进行浸出以回收锂、钴等。通常所用的酸有 HCl、H₂SO₄、HNO₃ 等。

在浸出过程中会产生大量酸性气体以及酸废液，造成一定污染。

b) 生物浸出

使用由微生物代谢活动产生的有机酸来浸出废旧锂离子电池中的锂、钴等金属。利用氧化亚铁硫杆菌代谢浸出材料中的金属。

浸出过程中产生的生物废液是污染所在。

c) 机械化学

将含钴酸锂的正极材料经过预处理，然后与聚氯乙烯（PVC）混合放入球磨机，在空气气氛中经过长时间充分机械研磨，PVC 中的氯元素与正极材料中的钴和锂发生化学反应，产物是两种溶于水的金属氯化物，最后采用简易的湿式水溶解法，即可实现钴和锂的回收。

这种方法最大的有点便是环境污染小，但依旧存在粉尘、废液、热污染等潜在的污染。

(3) 化学纯化过程污染

a) 溶剂萃取

为了将金属离子从浸出液中提纯，溶剂萃取过程通常与沉淀过程相结合来生产高纯度的金属盐。所用的萃取剂有 PC88A、Cyanex272 等对 Co、Li、Mn 进行高效回收。在这一过程中所产生的有机、无机废液是污染源所在。

b) 化学沉淀

向酸浸出溶液中添加特定的化学沉淀试剂，改变溶液的酸碱度、温度和沉淀剂的添加量，沉淀溶液中的 Co^{2+} 或 Co^{3+} ，得到含钴的产品。常用饱和草酸铵溶液等做沉淀剂。

所产生的污染有无机废液以及化学沉淀废渣。

c) 电解

采用电解的方法，控制含钴溶液的 pH 值，提取含钴产物。

电解过程中会产生的废气以及余下的废液是主要污染源。

B. 报废量预测

1. 中国混合动力汽车和纯电动汽车发展现状

自改革开放以来，我国汽车工业迅猛发展，据中国汽车工业协会统计，2016 年汽车产销创历史新高，燃油汽车的产销量分别为 2760.2 万辆和 2752.1 万辆。不过，正是由于燃油汽车的大量使用，汽车尾气排放成为城市大气污染的主要源头。汽车使用清洁能源已刻不容缓^[1]。高玉冰^[2]等运用生命周期评价(LCA)方法，选用美国阿贡国家实验室开发的 GREET 模型，对混合动力轿车、纯电动轿车全生命周期能耗及主要大气污染物排放进行了分析计算。结果表明，同传统汽油轿车相比，混合动力轿车、纯电动轿车全生命周期的能耗分别降低了 26.17% 和 39.24%， CO_2 排放量降低了 25.4% 和 39.7%。混合动力轿车、纯电动轿车的综合环境影响潜值分别为 1210、988，低于传统燃油汽车的 1670。从研究可知，以纯电动汽车和混合动力汽车为代表的新能源汽车相比传统燃油汽车而言，更加环境友好。

自发布《节能与新能源汽车产业发展规划（2012-2020 年）》后，国家启动了新能源汽车产业技术创新工程等产业化项目。2013 年 9 月财政部、科技部、工信部、发改委四部委连续发布《关于开展 1.6 升及以下节能环保汽车推广工作通知》、《关于继续开展新能源汽车推广应用工作的通知》，制定了 2013—2015

年开展新能源汽车推广应用的计划，随后发布首批 28 个示范城市（区域）。这一系列的政策举措，促进新能源汽车销量的增长。新能源汽车销量见表 B-1。

表 B-1 新能源汽车销量

	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年上半年
纯电动汽车	5579	11375	14604	45048	247482	40.9万	15.9万
插电式混合动力汽车	2580	1416	3038	29715	83610	9.8万	3.6万
新能源汽车	8159	12791	17642	74763	331092	50.7万	19.5万
纯电动汽车年度增长率	—	103.9%	28.4%	208.5%	449.4%	81.4%	—
插电式混合动力汽车年度增长率	—	-45.1%	114.5%	878.1%	181.4%	18.1%	—
纯电动车销量占比	68.4%	89%	82.8%	60.3%	74.7%	80.7%	81.5%
插电式混合动力汽车销售占比	31.6%	11%	17.2%	39.7%	25.3%	19.3%	18.5%

（数据来自盖世汽车网^[9]）

2012 年 5 月发布的《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》中曾提出中国新能源汽车发展分为酝酿期、导入期、成长期的三步走战略，同时提出到 2015 年导入期结束。从 2013 年到 2015 年底，插电式混动车型与纯电动车型是车企发展新能源汽车的两个重要方向。但随着导入期的结束、纯电动汽车在充电以及续航里程等这些问题上的技术突破以及国家对新能源汽车的补贴标准的变化，混合动力车所占据的市场份额下降，纯电动汽车占据的市场份额上升。

根据表 B-1 所示，从 2014 年至 2017 年上半年，纯电动汽车占新能源汽车比例稳步上升，从 60.3% 上升至 81.5%，而混合动力汽车比例则从 2014 年的 39.7% 下降至 2017 年上半年的 18.5%。可以预见，未来，纯电动汽车是我国新能源汽车发展的主要方向，混合动力汽车的市场占比将会越来越小。

从 2011 年到 2016 年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车销量分别从 5579 辆和 2580 辆大幅增长至 40.9 万辆和 9.8 万辆。其中，纯电动汽车又分为纯电动乘用车和纯电动商用车，它们从 2011 年到 2016 年的销量如下表。

表 B-2 纯电动汽车销量

	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年上半年
纯电动乘用车（辆）	4759	9555	9450	37800	142867	263000	132000
纯电动商用车（辆）	896	1686	3140	15700	148007	154000	27000

2. 中国动力电池现状

作为新能源汽车的核心零部件，动力电池的发展紧随新能源汽车整体市场趋势，从2015年新能源汽车市场开始大幅上涨后，动力电池市场也呈现爆发趋势。

根据中国电子网的统计，从动力电池历年出货量看，2015年开始动力电池产销量崛起，从2014年的仅3.7 GW·h的出货量跃居至2015年15.7 GW·h，同比增长超过3倍。2016年有产量的新能源汽车搭载电池总量达28 GW·h，与去年同期相比增长79%，超过去年全年动力电池出货量近12 GW·h。（注释：动力电池出货量为保守统计数据，源于新能源汽车产量与其搭载的电池容量乘积。由于未考虑其他影响因素，电池厂商实际产能会高于此。电池产量计算公式：车型搭载电池容量×车型产量。）

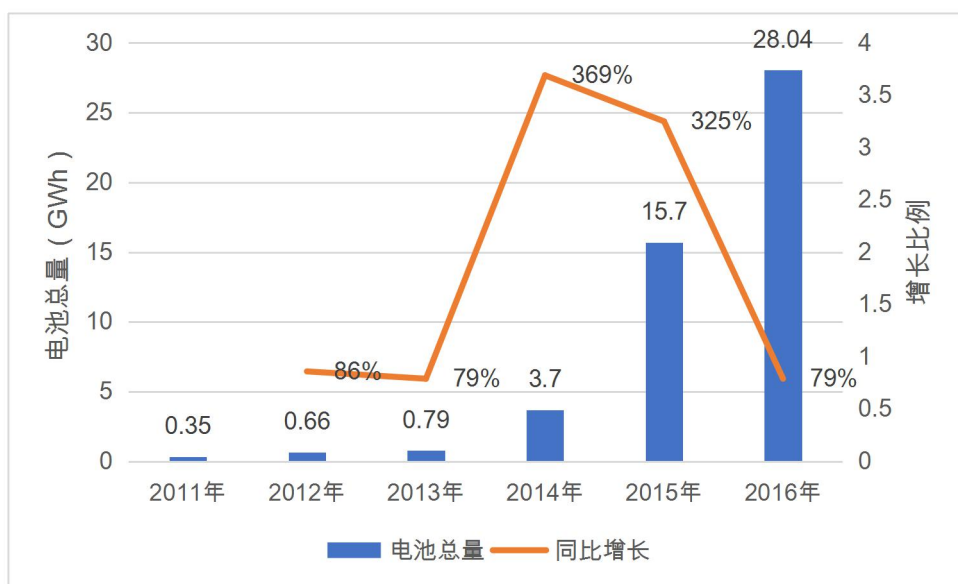


图 B-1 动力电池总量

目前，国内外主要动力电池为磷酸铁锂电池和三元锂电池。由于2016年工信部暂停三元锂电池客车列入新能源汽车推广应用推荐车型目录，所以，目前在新能源商用车领域多用磷酸铁锂电池。

根据动力电池中不同的正极材料的出货量来看，2015年磷酸铁锂电池出货量为10.86 GW·h，占据市场近69.1%份额；对应三元材料电池出货量为4.26 GW·h，占比27.1%；而对应锰酸锂、钛酸锂、超级电容、镍氢电池等其他材料电池出货量仅0.6 GW·h，占比3.8%。

表 B-3 2015 年动力电池出货量分布

电池种类	出货量	市场占比
磷酸铁锂	10.86GW·h	69.1%
三元材料	4.26GW·h	27.1%
其他（包括锰酸锂、钛酸锂、镍氢电池、超级电容等）	0.6 GW·h	3.8%
总计	15.72GW·h	100%

（数据来自中商情报网）

细分不同车型看,2015年新能源客车搭载电池量占据市场主力,达9.63Gwh,占全年总电池产量的61%;对应新能源乘用车搭载电池量为4.2Gwh,占比总量的27%;纯电动专用车搭载电池量达1.86Gwh,占比仅10%。

在2015年的纯电动汽车市场上,各种类型的动力电池在纯电动乘用车、纯电动客车和纯电动专用车的产量如下图。

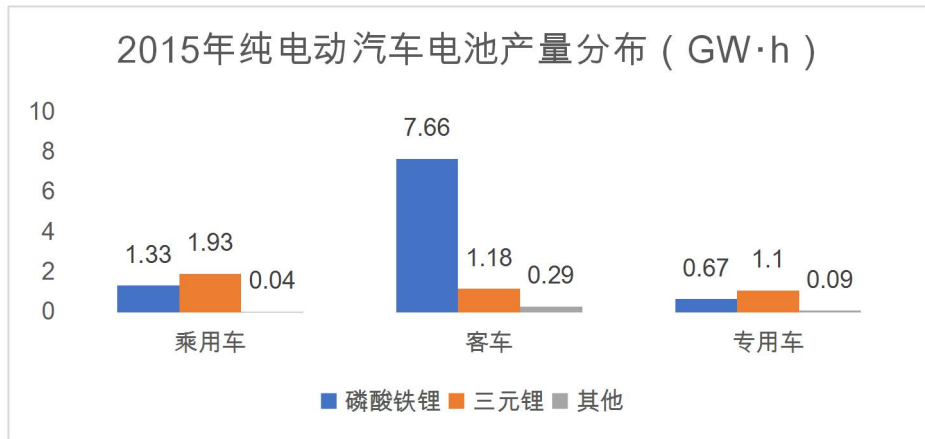


图 B-2 2015 年纯电动汽车电池产量分布

2016年磷酸铁锂电池依旧是市场主力,磷酸铁锂电池出货量达20.33GW·h,占据市场近72.5%份额;而三元材料电池受制此前政策禁用纯电动客车的影响,2016年搭载量仅为6.29GW·h,占比22.4%;其次,包括锰酸锂、钛酸锂、镍氢电池、超级电容等其他材料电池也均有小量搭载,出货量为1.42GW·h,占比5.1%。

表 B-4 2016 年动力电池出货量分布

电池种类	出货量	市场占比
磷酸铁锂	20.33 GW·h	72.5%
三元材料	6.29 GW·h	22.4%
其他（包括锰酸锂、钛酸锂、镍氢电池、超级电容等）	1.42 GW·h	5.1%
总计	28.04GW·h	100%

（数据来自中国电子网）

2016年新能源乘用车和客车电池搭载量累计分别达9.0Gwh和15.9Gwh，占比为32%和57%，而产出相对较少的纯电动专用车累计电池搭载量仅3Gwh，占比11%。

作为新能源汽车领域的重要分支——新能源客车，其搭载的电池类型主要为磷酸铁锂电池，全年累计搭载量达14.8Gwh，占比总出货量的53%。在新能源客车电池搭载量中占比高达93%，而在新能源乘用车领域比较受欢迎的三元锂电在客车领域受制政策压力，出货量被压缩到58.69Mwh，占比新能源客车电池搭载量的仅1%，而锰酸锂和钛酸锂也有少量出货量，累计0.96Gwh，累计占比3%。其中锰酸锂电池在插电式客车领域为主流电池类型，其搭载量达0.6Gwh。

3. 报废量预测

目前，国内对于动力电池报废量的研究较少。侯兵^[4]以及彭结林^[5]利用斯坦福模型构建了动力电池报废系统的数学模型，对我国汽车报废量进行了仿真预测。本研究主要依据新能源汽车产量、使用寿命对其报废量进行预测。

a) 使用寿命

动力电池经过多个周期充放电循环后会出现电池容量降低的情况，当放电容量减少至不足以满足电动汽车的要求时，该电池需更换。所以，动力电池的循环性能是衡量其质量的重要指标。由于纯电动汽车分为纯电动商用车和纯电动乘用车，这两种类型的车年均里程数有较大差距，所以，在计算动力电池使用寿命的时候也需要把这个因素考虑进去。

i. 年均行驶里程数

目前，国内在新能源汽车年均行驶里程数这一领域的研究几乎是空白。但是，由于新能源乘用车和轻型汽油车大多数为私家车，一般都用于满足普通家庭的出行代步的需求，据此推测，新能源乘用车年均行驶里程数与轻型汽油车年均行驶里程数相差不大。新能源商用车的主要用于载客和载货，以重型车的种类居多，所以与重型柴油车可相类比。

林秀丽等研究表明，除公交车外，其机动车的年累积行驶里程随车龄的增加而呈对数递减，即随着车龄的增加，累积行驶里程的增长速率减缓。清华大学和中国环境科学研究院联合编制的《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指

南》建议有条件的地方开展实际调查，获得分车龄的年均行驶里程数据，并给出无法获取详细年均行驶里程时可参考《指南》中 1.8 万公里^[6]。何立强等^[7]就北京、广州等国内 10 余座典型城市的实地调查结果，获得我国机动车的年均行驶里程数。由于我国从 2013 年开始新能源汽车销量大幅提升，所以，市面上的新能源汽车绝大多数车龄小于 4 年，结合何立强等的研究结果可得，我国新能源乘用车年均行驶里程数为 2 万公里。Huo Hong 等^[8]研究给出我国重型柴油货车分车龄 VKT-Ratios，通过确定我国重型柴油车年均行驶里程，并结合 VKT-Ratios 可获得分车龄年均行驶里程，得出整个车队年均行驶里程为 8 万公里左右。何立强等^[7]通过调研得到出租车年均行驶里程约为 8——10 万公里。结合 Huo Hong 和何立强等的研究，并且为了后续计算方便，我们之后的计算取新能源商用车平均行驶里程数为 8 万公里。

ii. 循环寿命

循环寿命 (cycle life) 是指一个电池在达到电池寿命终止条件前能够执行的循环次数，在具体的实验中，每次充放电循环都有确定的充电和放电制度，以及确定的充电和放电终止判据。

动力电池的健康状态(state of health, SOH)，也称为电池的寿命状态，是电池健康状态的表征参数。SOH 是在标准条件下动力电池从满充状态以一定的倍率放电到截止电压所放出的容量与其对应的标称容量的比值，该比值反应了电池的寿命状况。当电池容量达到电池标称容量的 80%时，即可认为达到了车用电池的寿命终止条件。

Sergio Manzetti 等通过对文献数据的统计，得出循环寿命如表 B-6。

表 B-5 动力电池主要类型性能

电池类型	Specific energy (Wh/kg)	Energy/Volume coefficient (Wh/L)	Power/Weight coefficient (W/kg)	Self-discharge coefficient (% per 24 h)	Number of recharging cycles
Pb-acid	40	70	180	1	500
Ni-Cd	60	100	150	5	1350
NiMH	70	250	1000	2	1350
Li-ion	125	270	1800	1	1000

Li-ion polymer	200	300	3500	1	1000
Na-NiCl	125	300	1500	0	1000

Jens F. Peters 等^[9]对之前动力电池循环寿命的相关研究进行统计，以及整理出 battery database 数据，统计结果如下表。

表 B-6 循环寿命统计

	LFP	LFP-LTO	LCO	LMO	NCM	NCA
LCA studies-min	600	5000	400	685	953	1690
LCA studies-max	6000	10000	1500	1300	3000	5000
LCA studies-avg.	2575	7917	967	1006	1659	2832
Batt-DB-avg.	2960	13850	900	1268	1217	2200

在 Sergio Manzetti 的研究中，并没有就锂电池的不同正极类型进行分类，但从 Jens F. Peters 的研究可知，不同正极类型电池的循环寿命差距较大。而从 Jens F. Peters 研究中，不难看出同种正极类型锂电池的循环寿命测试结果相差也较大。这是因为动力电池实际循环寿命受温度、充放电频率、搁置时间等因素的影响。就目前动力电池制造水平来说，三元锂电池以及磷酸铁锂电池的循环寿命普遍多于 1000 次，也就是说 Sergio Manzetti 等人研究的循环寿命水平偏低。目前中国市场上主要使用的锂电池类型为三元锂电池和磷酸铁锂电池，而三元锂电池中又主要采用 NCM。

iii. 日历寿命

日历寿命(calendric ageing)是一个电池在达到寿命终止条件前能够持续执行某一确定操作的工作时间长度。这个老化效应主要是由于化学副反应，它随时间发生，主要影响因素是电池内部的储存温度^[10]。只有很少的 LCA 研究考虑到这个电池老化因素，而且都是简略地提到。独立于电池的化学反应，他们都假定一个日历生命是 10 年，并且通过减少/增加这个值 30%或 50%的敏感性分析来改变生命周期。然而，特别是对于年平均行驶里程较低的车辆来说，这个老化因素可能是电池降解的主要原因^[9]。

S.J. Gerssen-Gondelach 等^[11]认为在 2015 年—2025 年—2025 年之后，动力电池的日历寿命分别为 7 年—10 年—12 年。

宁德时代作为我国最大的电池生产商，结合自身工艺提出一个寿命预测曲线。根据图 B-6 可知，该预测模型预测动力电池使用寿命大约为 6-8 年或者行驶里程达到 20 万公里左右则动力电池达到报废水平^[12]。

综上所述，目前动力电池的日历寿命大约为 6-8 年。在使用寿命计算中，为了计算方便，我们取动力电池的日历寿命为 7 年。

iv. 续航里程

续航里程的大小影响着电池充电频率，一般来说，续航里程长的新能源汽车行驶相同里程数，充电频率更低；反之，则充电频率更高。在循环寿命相同的情况下，充电频率越高，动力电池的使用寿命就越短。

崔东树等^[13]对工信部网站公布的新能源车免征购置税前九批目录进行统计，得到我国前九批纯电动汽车续航里程如下表 B-7。

表 B-7 纯电动汽车续航里程统计

续航里程 (km)	第一 批	第二 批	第三 批	第四 批	第五 批	第六 批	第七 批	第八 批	第九 批	平 均
乘用车	156	136	157	170	164	168	175	189	193	168
客车	233	221	208	241	233	259	281	263	272	246
专用车	150	130	148	152	171	166	208	227	229	176

v. 使用寿命确定

动力电池理论可行驶里程数计算公式为：

$$L_1 = C \times L_2 \times \delta_1 \times \delta_2 \quad (1)$$

式中， L_1 ——理论可行驶里程数；

C ——循环寿命；

L_2 ——续航里程

δ_1 ——容量衰减系数

δ_2 ——续航里程衰减系数

使用寿命公式为：

$$Y = \frac{L_1}{A} \quad (2)$$

式中， L_1 ——理论可行驶里程数；

A ——年均行驶里程数；

Y ——使用寿命

上述公式可用来估算新能源商用车的使用寿命，对于新能源乘用车不太适用，原因是，对于年平均行驶里程较低的车辆来说，由于化学副反应导致的电池

老化可能是电池降解的主要原因^[9]。也就是说日历寿命可能才是电池使用寿命的决定因素而不是循环寿命。

δ_1 、 δ_2 分别代表容量衰减系数和续航里程衰减系数，根据 SOH 的定义，当电池容量达到电池标称容量的 80% 时，即可认为达到了电池的寿命终止条件。在此计算中，我们取 δ_1 为 0.8。由于容量和续航里程息息相关，所以 δ_2 会随 δ_1 变化，为了计算方便，我们也取 δ_2 为 0.8。

下表 B-8 是基于公式（1）预测的纯电动商用车动力电池使用寿命，由于之前相关政策限制三元锂电池在新能源商用车上的使用，在新能源商用车领域，磷酸铁锂电池占比占绝对优势地位（见中国动力电池现状章节），所以，在下面计算中，在商用车领域我们使用磷酸铁锂的循环寿命数据。

表 B-8 纯电动商用车预测使用寿命

平均循环寿命（次）	2767.5 (LCA studies-avg. 和 Batt-DB-avg. 的平均值)
平均续航里（km）	246
年均行驶里程数（km）	80000
使用寿命（年）	5

对于新能源乘用车，同样采取表 1-5 的计算方法，取 NCM 的循环寿命试算，得出使用年限为 7.7 年，大于日历寿命 7 年。根据表 B-6 可知，磷酸铁锂正极的动力电池可循环次数较 NCM 正极动力电池可循环次数更多，意味着其计算出的使用年限会大于 7.7 年，更大于日历寿命 7 年。所以，在后文计算中，我们以新能源乘用车日历寿命为新能源乘用车的使用寿命（即为 7 年）。

vi. 纯电动汽车动力电池报废量估算

目前，我国乘用车大约使用至 12—15 年左右报废，商用车强制报废 10 年^[4]。本研究假设乘用车报废年限为 14 年，商用车报废年限为 10 年。而我国自 2013 年开始，新能源汽车才开始迅猛发展，也就是说，到 2020 年，新能源汽车还未到报废的阶段。且动力电池的使用寿命较整车使用寿命短，在整车报废前，动力电池可能已经更换了几次。本研究采用纯电动汽车产量数据推出每一年的报废的纯电动汽车使用的动力电池数。

根据表 B-2 的数据以及据彭结林等^[5]研究预计 2017 年——2020 年纯电动汽车产量。我们可以估计纯电动汽车报废电池量，如表 B-9。

表 B-9 纯电动汽车销量

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 (预)	2018 (预)	2019 (预)	2020 (预)
纯电动乘用车(辆)	4759	9555	9450	37800	142867	263000	345000	553000	746000	1194000
纯电动商用车(辆)	896	1686	3140	15700	148007	154000	198000	260000	302000	411000

表 B-10 纯电动汽车报废电池量

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
乘用车电池(组)	—	—	4759	9555	9450	37800	142867	263000	345000	557759
商用车电池(组)	896	1686	3140	15700	148007	154896	199686	263140	317700	559007
总计	896	1686	7899	25255	157457	192696	342553	526140	662700	1116766

纯电动乘用车动力电池组质量一般在 300—800kg，纯电动商用车动力电池组质量一般在 800—3000kg。本研究假设乘用车动力电池组质量为 550kg，商用车动力电池组质量为 1900kg。计算的纯电动汽车报废电池质量如表 B-11。

表 B-11 纯电动汽车报废电池质量(单位:吨)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
乘用车			2617	5255	5198	20790	78577	144650	189750	306767
商用车	1702	3203	5966	29830	281213	294302	379403	499966	603630	1062113
总计	1702	3203	8583	35085	286411	315092	457980	644616	793380	1368881

根据表 B-10 和 B-11 动力电池报废量的估算结果，可得出 2016-2025 年我国纯电动汽车动力电池报废量的发展趋势如图 B-3 所示。

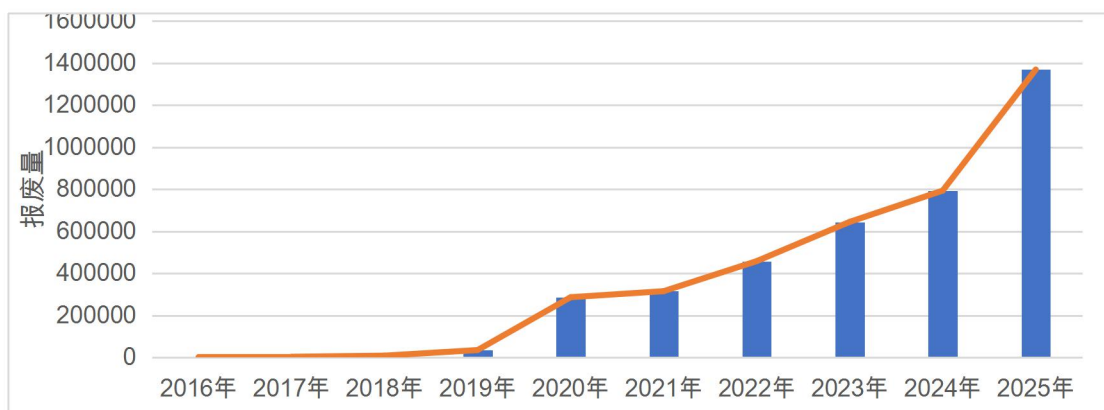


图 B-3 2016-2025 年纯电动汽车动力电池报废量的发展趋势

可以看出，我国纯电动汽车动力电池报废量在未来几年一直呈现上升趋势，在 2019-2020 年间以及 2024 和 2025 年间增速最大。2025 年左右，报废动力电池数量将达到 136.8881 万吨。

由于 2016 年时，国家禁止了三元锂电池在客车上的运用，所以，导致 2016 年时三元锂电池在商用车运用上占比几乎为 0。2017 年开始，国家在政策上有所放

松，允许三元锂电池在客车上应用。从这个角度考虑，选用 2016 年的三元锂电池和磷酸铁锂电池比例作为未来纯电动汽车动力电池比例有失偏颇。又由于 2015 年之前的磷酸铁锂和三元锂电池比例统计数据有所缺失。综上所述，在本研究中，我们暂且将 2015 年的磷酸铁锂和三元锂电池比例作为未来动力电池三元锂电池和磷酸铁锂电池的比例，为 69.1%和 27.1%。磷酸铁锂和三元锂电池的报废量预测如下表 B-12 和下图 B-4。

表 B-12 磷酸铁锂和三元锂电池报废量（单位：吨）

	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年
磷酸铁锂	1176	2213	5931	24244	197910	217729	316464	445430	548226	945897
三元锂	461	868	2326	9508	77617	85390	124113	174691	215006	370967

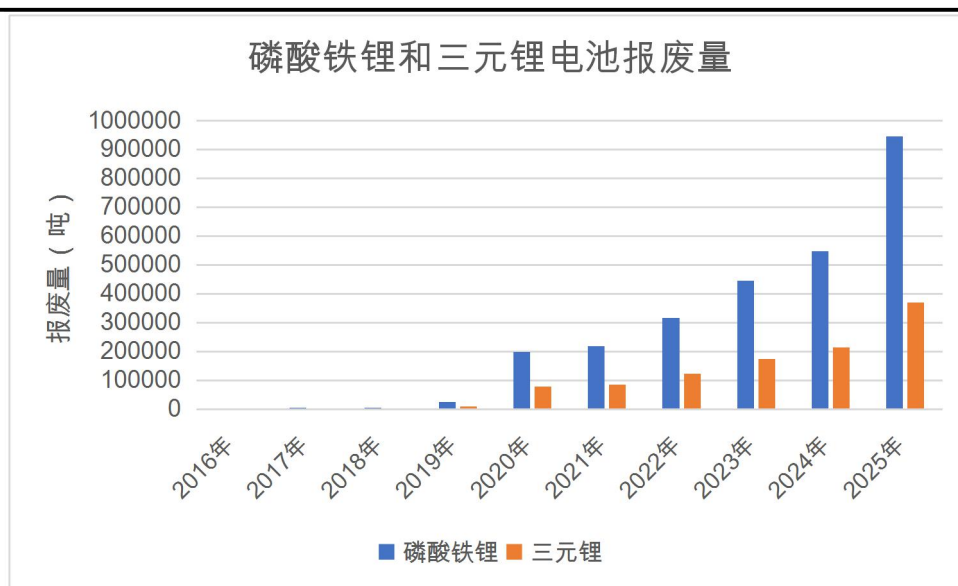


图 B-4 2016-2025 年磷酸铁锂和三元锂电池报废量的发展趋势

vii. 结论及建议

(1) 对纯电动汽车动力电池的使用寿命进行分析研究，结果表明，新能源商用车的平均寿命为 5 年，新能源乘用车平均寿命为 7 年。

(2) 根据使用寿命对纯电动汽车动力电池报废量进行预测可知，在 2016 年至 2019 年动力电池报废量较低，自 2019 年后，动力电池报废量增速较大，至 2025 年报废量将达到 136.8881 万吨。

基于本文研究，我们认为，自 2019 年后，会有较大规模的动力电池报废量并且逐年以较大增速增长。所以，我们建议，纯电动汽车动力电池回收机制应在 2019 年初步建立，且在制定回收机制时应该考虑未来报废量变大的问题，选择

更适合这种变化规律的回收利用机制和回收利用方式，同时要提前建立处理能力较大的处理厂以应对电池报废量的剧增。

C. 已有政策罗列

政策名称	发布时间	发布单位	相关要点或内容
汽车产品回收利用技术政策	2006.2.6	发改委,科技部,环保总局	电动汽车(含混合动力汽车等)生产企业要负责回收、处理其销售的电动汽车的蓄电池。(责任主体)
节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)	2012.7.10	国务院	构建动力电池梯级利用回收利用体系。 在试点城市开展电池回收利用的综合评价。 加强动力电池梯级利用和回收管理。 引导动力电池生产企业加强对废旧电池的回收利用,鼓励发展专业化的电池回收利用企业。 示范城市安排一定资金,重点用于电池梯级利用和回收体系。
国务院办公厅关于加快新能源汽车推广应用的指导意见	2014.7.14	国务院办公厅	鼓励支持社会资本进入电池回收服务领域。 研究制定回收利用政策,探索利用基金、押金、强制回收等方式促进废旧动力电池回收。
汽车动力蓄电池行业规范条件	2015.3.24	工信部	1、主体为动力蓄电池系统生产企业以及单体动力蓄电池生产企业。文件从企业基本要求、生产条件要求、技术能力要求、产品要求、质量保证能力要求、销售和售后服务、规范管理等七个方面对汽车动力蓄电池行业给出规范意见。 2、动力蓄电池系统生产企业应会同汽车整车企业研究制定可操作的废旧动力蓄电池回收处理、再利用的方案。

<p>电动汽车动力 蓄电池回收利 用技术政策 (2015 年版)</p>	<p>2016.1.5</p>	<p>工信部、环保 部、商务部、 质检总局</p>	<p>落实生产者责任延伸制度：不同企业分别承担各自生产使用的动力蓄电池回收利用的主要责任。</p> <p>一、设计与生产端：</p> <p>1、无毒无害化设计，符合《汽车禁用物质要求》（GB/T 30512）。</p> <p>2、生产企业提供拆解、拆卸技术信息。</p> <p>3、建立编码制度，生产企业对电池编码；电池信息登记，确保可追溯。</p> <p>二、回收端：</p> <p>1、生产企业制定回收网点进行回收，并负责电池回收信息统计与上报。</p> <p>2、回收企业需符合相应条件。</p> <p>3、规定用户需将电池向符合条件的回收企业交售；回收利用企业向符合条件的梯级利用企业交售电池。</p> <p>4、对于回收过程中电池的拆卸、贮存、运输、放电进行规范。</p> <p>三、利用端：</p> <p>1、遵循先梯级利用后再生利用的原则；对电池要进行信息记录。</p> <p>2、梯级利用企业根据实际情况判断电池是否可以梯级利用，并进行必要的检测、分类、拆解、重组，建立追溯系统。</p> <p>3、再生利用企业要符合拆解、热解、破碎分选、冶炼的相应规范进行再生利用。</p> <p>4、国家将在现有资金渠道内对梯级利用企业和再生利用企业的技术研发、设备进口等方面给予支持。</p> <p>5、在技术研发方面，国家支持动力蓄电池相关回收利用技术和装备的研发。</p>
<p>新能源汽车废 旧动力蓄电池 综合利用行业 规范条件</p>	<p>2016.2.4</p>	<p>工信部</p>	<p>要求企业布局与项目建设条件符合规定，规模、装备和工艺达到要求，资源回收以及梯级利用符合国家规定，相关资源综合回收率达到一定水平，通过 ISO 环境管理体系认证，具备完善的环境管理保障体系。</p>
<p>关于推进“互联 网+”智慧能源 发展的指导意 见</p>	<p>2016.2.24</p>	<p>发改委、能源 局、工信部</p>	<p>推动电动汽车废旧动力电池在储能电站等储能系统实现梯次利用。</p>
<p>“十三五”生态 环境保护规划</p>	<p>2016.11.24</p>	<p>国务院</p>	<p>健全再生资源回收利用网络，规范完善废旧动力电池等综合利用行业管理。尝试建立逆向回收渠道，推广“互联网+回收”、智能回收等新型回收方式，实行生产者责任延伸制度。</p>

新能源汽车动力电池回收利用管理暂行办法	2016.12.1	工信部	<p>1、强调进一步落实生产者责任延伸制度，汽车市场企业承担回收利用主体责任。鼓励开展梯级利用以及回收利用。</p> <p>2、对电池设计、生产、使用、维修等各阶段进行规定，并明确用户使用、电池收集、运输、贮存等的各阶段的要求。</p> <p>3、在综合利用阶段规定企业在梯级利用以及回收利用阶段应遵守相关规定。</p> <p>4、明确了各方面监督管理职责，指出要建立信息管理系统及溯源管理系统。</p> <p>5、同时，也明确了车企、电池企业、回收企业违反规定应收到的相应的惩罚措施</p>
“十三五”国家战略性新兴产业发展规划	2016.11.29	国务院	推进动力电池梯次利用，建立上下游企业联动的动力电池回收利用体系。
关于加快推进再生资源产业发展的指导意见	2016.12.21	工信部、商务部、科技部	<p>1、重点强调开展新能源汽车动力电池回收利用试点，建立完善废旧动力电池资源化利用标准体系，推进废旧动力电池梯级利用以及再利用技术的研究、产品开发及示范应用。</p> <p>2、强调以企业为主体，政府完善相关支持政策。</p> <p>3、通过物联网、大数据等信息化手段，建立可追溯管理系统。</p>
废电池污染防治技术政策	2016.12.26	环保部	<p>技术指导</p> <p>1、提出逐步建立收集、运输、贮存、利用、处置过程的信息化监管体系，鼓励采用信息化技术建设废电池的全过程监管体系。应用“物联网+”等信息化技术建立废电池收集体系，并通过信息公开等手段促进废电池的高效回收。</p> <p>2、鼓励电池生产企业、废电池收集企业及利用企业等建设废电池收集体系。鼓励电池生产企业履行生产者延伸责任。</p> <p>3、指出电池在运输、贮存、利用、处置注意事项以及建议采取的处理措施及污染物排放所需遵循的国家标准。</p> <p>4、鼓励发展废锂离子电池分离拆解技术以及回收利用高新技术。</p>

生产者责任延伸制度推行方案	2016.12.25	国务院办公厅	<p>1、建立电动汽车动力电池回收利用体系。电动汽车及动力电池生产企业应负责建立废旧电池回收网络，利用售后服务网络回收电池并统计信息，确保安全回收。</p> <p>2、动力电池生产企业应实行产品编码，建立全生命周期追溯系统。</p> <p>3、率先在深圳等城市开展回收利用体系建设。</p> <p>4、2017年前完成电动汽车动力电池产品编码制度和全生命周期追溯系统的建立。制定新能源汽车动力电池回收利用暂行办法。</p> <p>5、政府加强信用评价，对失信企业进行联合惩戒；同时鼓励引入第三方机构对生产企业评价核证；取缔非法回收站点。</p>
新能源汽车生产企业及产品准入管理规则	2017.1.16	工信部	<p>1、汽车生产企业应当建立新能源汽车产品售后服务承诺制度。售后服务承诺包括电池回收。</p> <p>2、汽车生产企业应实施新能源汽车动力电池溯源信息管理，跟踪记录动力电池回收利用情况。</p>
促进汽车动力电池产业发展行动方案	2017.2.20	工信部、发改委、财政部、科技部	<p>1、动力电池回收利用实现自动化、智能化发展。</p> <p>2、加强动力电池回收利用标准的制修订工作；制定并实施动力电池规格尺寸、产品编码规则等标准。</p> <p>3、落实《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策（2015年版）》；适时发布实施动力电池回收利用管理办法，强化企业各环节主体责任，逐步建立完善动力电池回收利用管理体系。</p>
车用动力电池回收利用 拆解规范	2017.5.17	国家标准化管理委员会	<p>1、电动汽车用废旧动力电池包（组）、模块的拆解，不适用于电动汽车用废旧动力电池单体的拆解。</p> <p>2、对废旧动力电池回收利用的设备要求、安全性、预处理到电池包(组)的拆解再到模组拆解、存储和管理等方面进行严格要求。</p>
汽车动力电池编码规则	2017.8.4	国家标准化管理委员会	<p>1、对汽车用动力以及梯级利用的电池包（组）、电池模块、单体电池进行编码，使二者建立对应关系。</p> <p>2、适用于汽车用动力电池产品生产、销售、使用、维护、回收、梯级利用、再生利用等全生命周期的溯源与管理。保证电池信息确认的一致性和唯一性</p>
车用动力电池回收利用 余能检测	2017.8.4	国家标准化管理委员会	对回收后的电池对外观检查、电压判别、充放电电流判别、不同类型的车用动力电池余能测试等检测流程进行规定，为电池二次使用提供评价依据。
电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸	2017.8.4	国家标准化管理委员会	规定了电动汽车用动力蓄电池单体、模块和标准箱尺寸规格要求。
关于促进储能技术与产业发展的指导意见	2017.10.12	发改委、财政部、科技部、工信部、能源局	完善动力电池全生命周期监管，开展对淘汰动力电池进行储能梯次利用研究。

《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》	2018.01		
------------------------	---------	--	--

D. 动力电池成本构成分析

动力电池生产成本包括正极材料、负极材料、电解液、隔膜、结构件、NMP、铜箔材料及人工税费等部分。

1. 正极材料：

(1) 磷酸铁锂

该材料具有橄榄石晶体结构，是近年来研究的热门锂电池正极材料之一。其理论容量为 170 mAh/g，在没有掺杂改性时其实际容量已高达 110 mAh/g。通过对磷酸铁锂进行表面修饰，其实际容量可高达 165 mAh/g，已经非常接近理论容量，材料价格约为 80 元/kg。

(2) 镍钴锰酸锂三元材料 (NCM)

相比于其他锂离子电池正极材料，NCM 材料具有高比容量、低成本和良好的热稳定性等优点，因此在储能领域、电动汽车领域具有十分广阔的应用前景。

NCM 材料中主要的过渡元素为 Ni、Mn 和 Co，其中三种元素不同配比可以获得不同性能的 NCM 材料，例如 NCM111、NCM523、NCM622 等，由于元素配比不同使得在与电解液接触时材料的稳定性也随之变化，从而造成材料寿命的变化。目前 NCM 的实际比热容在 140-190 之间。价格成本为 120 元/kg-200 元/kg。

(3) 镍钴铝酸锂三元材料 (NCA)

目前三元电池厂商主要应用的是 333 和 523 电池，622 仅有部分厂商使用。随着材料体系的高镍化进程，预计明年国内三元电池厂商将开始应用 811 和 NCA 材质，NCA 材质的实际比容量在 160-190 之间，电池单体能量密度将从 200wh/kg 向 250-300wh/kg 迈进。

理论与实际容量差别较大，是由于三元材料在结构上为层状化合物，一旦锂离子的脱出数过多会引起化合物结构的不可逆相变，破坏化合物整体结构。由此，对于三元材料等层状化合物材料，其容量取决于在不影响结构可逆变化的前提下实际可脱出的锂离子的最大的量。在实际应用中，由于需要保证材料的结构稳定，脱锂量有限导致实际容量与理论容量之间具有较大差异。

根据实际比容量和工作电位相乘得到得到材料比容量，可以测算出 1kwh 所需正极材料数，如表 D-1 所示。

表 D-1 单位 KWH 所需正极材料测算表

正极材料	LFP	NCM111/33	NCM52	NCM62	NCM81	NCA
		3	3	2	1	
理论比容量 (mAh/g)	170	-	-	-	-	-
实际比容量 (mAh/g)	130-140	145-155	155-170	160-170	160-190	160-190
工作电位 (V)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
材料比能 (Wh/kg)	493	555	592	629	666	703
1KWh 所需材料数 (kg/KWh)	2.03	1.8	1.69	1.59	1.5	1.42
材料价格 (元/Kg)	80	120	140	160	200	220
KWH 成本 (元/KWH)	162.27	252.25	270.27	286.17	300.3	312.94

数据来源：赛瑞研究 安信证券

2. 负极材料

锂电池负极材料处于锂电池产业中游的最核心的环节，按电池成本分布，锂电池负极材料及其他占比锂离子电池总成本的 28%左右。好的负极材料应该满足如下要求：比能量高、相对锂电电极的电极电势低；充放电反应可逆性好；与电解液和粘结剂的兼容性好；比表面积小 ($<10\text{m}^2/\text{g}$)。

(1) 天然石墨

天然石墨一般以石墨片岩，石墨片麻岩等矿石出现，优点是化学能量高、工艺成熟、放电电压平稳。缺点是电池容易鼓胀。根据中国储能网的数据天然石墨的实际比容量为 330mah/g. 天然石墨一般用于 LFP 电池，因此工作电压用 3.4V

(2) 人造石墨

人造石墨通常指以炭质原料为骨料、煤沥青等为粘接剂、经过配料、混捏、成型等工序值得的块状固体材料。根据中国储能网的数据天然石墨的实际比容量为 350mah/g. 人造石墨一般用于 NCM 电池，因此工作电压用 3.7V

(3) Si-C

Si 基负极材料最大的优势在于极高的理论能量密度 (4200mAh/g)，远高于石墨。这也符合新能源汽车对电池的要求。硅基负极材料最大的不足就是膨胀问题，充电后易膨胀碎裂，无法复原，导致材料最终出现粉末化，大大缩短了电池

寿命。在充放电过程中会有 300%的膨胀，而相同条件下石墨只有 7%。目前松下最新研发的碳硅基复合材料负极中硅的含量达到了 10%，可以看出随着技术水平的进步还有很大的发展空间。根据中国储能网的数据天然石墨的实际比容量为 1000mah/g. Si-C 一般用于 NCM 电池，因此工作电压用 3.7V

表 D-2 单位 KWH 所需负极材料测算表

负极材料	天然石墨	人造石墨	Si-C
理论比容量 (mAh/g)	372.24	372.24	4198.15
实际比容量 (mAh/g)	330.00	350.00	1000.00
工作电位 (V)	3.40	3.70	3.70
材料比能量 (Wh/kg)	1122.00	1295.00	3700.00
1KWh 所需材料数 (kg/KWh)	0.89	0.77	0.27
KWH 成本 (元/KWH)	35.65	45.00	27.03

数据来源：中国储能网、国信证券、安信证券

3. 电解液

电解液成本目前 90%以上都是原材料，其中以当前价格计算，电解液成本占比 50%为溶质，17%为溶剂，21%为添加剂。溶剂生产主要原材料为环氧丙烷，隶属石油化工产品，其价格受环保整治带来的供给周期波动；添加剂种类多，行业小，供给稳定，价格大幅波动可能小。人工费用和制造费用在电解液中占比较低，目前约 10%左右。电解液定价方式基本不依赖供需关系。龙头企业与下游厂商协商后按一定“加工费”进行定价，其余厂商在此基础上定价。市场上的溶质以六氟磷酸锂 (LiPF₆) 为主，松下 NCR18650 电池也选用了六氟磷酸锂作为溶质，每 kWh 锂电池需要 0.15kg 的六氟磷酸锂。

表 D-3 单位 KWH 所需电解液材料测算表

电解液	
电解液经验用量 (kg/kwh)	1.5
LFP 电解液价格 (元/kg)	75
LFP 电解液成本 (元/KWH)	112.5
LFP/NCM 能量密度换算系数	0.86
NCM 电解液成本 (元/KWH)	96.88

数据来源：高工锂电

4. 隔膜

锂离子电池中，隔膜占据关键位置：隔膜是一种具有微孔结构的薄膜，是锂离子电池产业链中最具技术壁垒的关键内层组件

锂电池隔膜确保电池安全运作，好的隔膜能够直接提升电池的综合性能：隔膜在锂电池中起到如下两个作用：1) 隔开锂电池的正、负极，防止正、负极接触形成短路；2) 隔膜中的微孔能够让锂离子通过，形成充放电回路。高性能锂电池需要隔膜具有厚度均匀性以及优良的力学性能、透气性能与理化性能。隔膜的优异与否直接影响锂电池的容量、循环能力以及安全性能等特性，性能优异的隔膜对提高电池的综合性能具有重要的作用。

根据制造工艺，隔膜可以分为湿法隔膜与干法隔膜两类湿法隔膜厚度小，孔隙率高，力学性能优越，涂覆技术能够提高湿法隔膜热稳定性。干法隔膜一般用于磷酸铁锂电池，根据中国电池网的数据，干法（LFP）隔膜经验用量为 23 平米/kwh。16 年的行业数据显示干法隔膜平均成本为 4.5 元/平米。湿法隔膜一般用于三元电池中，湿法隔膜经验用量为 15 平米/kwh。16 年的行业数据显示湿法隔膜平均成本为 5.5 元/平米。

表 D-4 隔膜材料测算表

隔膜	
干法（LFP）隔膜经验用量（平米/kwh）	23
湿法（NCM）隔膜经验用量（平米/kwh）	15
湿法隔膜渗透率	43%
干法隔膜价格（元/平米）	4.5
湿法隔膜价格（元/平米）	5.5
干法隔膜成本（元/KWH)	103.5
湿法隔膜成本（元/KWH)	82.5

数据来源：ofeek 锂电网、星源材质公司公告

5. 结构件、NMP、铜箔成本

(1) 结构件

作为锂电池和电池模组的重要组成部分，精密结构件主要包括铝/钢壳、盖板、连接片等，对锂电池的安全性、密闭性、能源使用效率等都具有直接影响。由于新能源汽车在使用过程中需要大量的电芯串、并联在一起保证能量供应，导致需要使用大量的结构件产品以保证动力电池的安全。锂电池结构件市场广阔，

锂电池结构件占电芯原料成本 10-15%，占比不亚于负极、点解液、隔膜，为锂电池的重要材料。根据高工锂电数据，结构的单位成本为 76 元/KMH。

表 D-5 结构件材料测算表

结构件（铝带、盖帽）	
LFP 结构件经验成本（元/KWH）	75.96
LFP/NCM 能量密度换算系数	0.86
NCM 结构件经验成本（元/KWH）	65.41

数据来源：国轩高科公司公告 高工锂电

(2) NMP（正极分散溶剂）

NMP 成本数据参考 15 年国轩高科借壳上市的公告数据得表 D-6:

表 D-6 NMP 材料成本测算表

NMP	
LFP 类 NMP 成本（元/KWH）	46.90
LFP/NCM 能量密度换算系数	0.86
NCM 类 NMP 成本（元/KWH）	40.39

数据来源：国轩高科公司公告 高工锂电

(3) 铜箔

动力电池的锂电铜箔需求快速增长，将从 2015 年 2 万吨增长为 2020 年 10 万吨。锂电池中负极集流体的铜箔用量为 2-3.5g/ah，考虑材料使用率，平均为 3g/ah，假设输出电压为 3.6V，可计算得到每 KWH 所需铜箔为 0.87 公斤。

表 D-7 铜箔材料成本测算表

铜箔	
LFP 锂电铜箔平均用量（kg/KWH）	0.80
LFP 锂电铜箔价格(元/KG)	80
LFP 锂电铜箔成本(元/KWH)	64.00
LFP/NCM 能量密度换算系数	0.87
NCM 锂电铜箔成本（元/KWH）	55.45

数据来源：国轩高科公司公告 高工锂电

6. 成本拆分汇总

根据上述分析，最后可以总结得到 LFP 的含税成本大约为 1270 元/KWH，NCM111 为 1225 元/KWH，NCM523 为 1245 元/KWH，NCM622 为 1263 元/KWH，NCA 为 1284 元/KWH。

表 D-8 锂电池成本测算分析汇总表

成本分析（单位：元/KWH）		2016
正极	LFP	162.27
	NCM111	252.25
	NCM523	270.27
	NCM622	286.17
	NCM811	300.30
	NCA	312.94
负极	天然石墨(LFP)	35.65
	人造石墨(NCM)	34.75
	Si-C（NCA）	27.03
电解液	LFP 电解液	112.50
	NCM 电解液	96.88
隔膜	干法隔膜(LFP)	103.50
	湿法隔膜(NCM)	82.50
四大部件总成本	LFP	413.92
	NCM111	466.38
	NCM523	484.39
	NCM622	500.29
	NCM811	506.70
	NCA	519.35
电芯其他成本	LFP 锂电铜箔	64.00
	NCM 锂电铜箔	55.45
	LFP 结构件（铝带、盖帽等）	75.96
	NCM 结构件（铝带、盖帽等）	65.41
	LFP 类 NMP	46.90
	NCM 类 NMP	40.39
人工以及制造费用	LFP	172.38
	NCM	148.44
电力使用量		59.53
电芯总成本（元/kwh）	LFP	925.21
	NCM111	928.43
	NCM523	948.45
	NCM622	966.11
	NCM811	973.24
	NCA	987.28
PACK 成本（元/kwh）	LFP	344.86
	NCM	296.96
总成本（含税）（元/kwh）	LFP	1270.07
	NCM111	1225.39
	NCM523	1245.41
	NCM622	1263.08
	NCM811	1270.20

	NCA	1284.25
总成本（不含税）（元/kwh）	LFP	1085.53
	NCM111	1047.34
	NCM523	1064.46
	NCM622	1079.55
	NCM811	1085.64
	NCA	1097.65

7. 各类电池成本占比情况

对市场上各主流电池的成本占比情况分析发现，LFP 电池的主要成本构成为负极材料，大约占 21%，其次是正极材料，占比 19%。而三元电池的主要成本构成为正极材料，占比在 30%-35%之间，其次为负极材料，占比约为 17%。

LFP成本占比情况

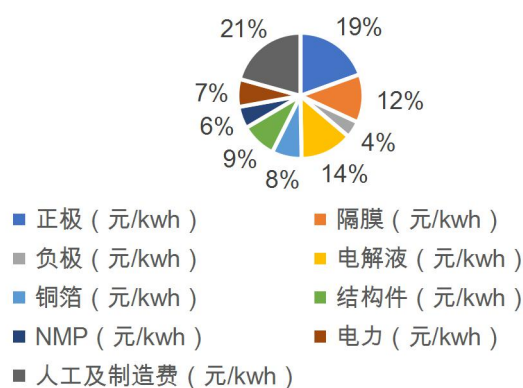


图 D-1. LFP 电池成本占比情况图

NCM11成本占比情况

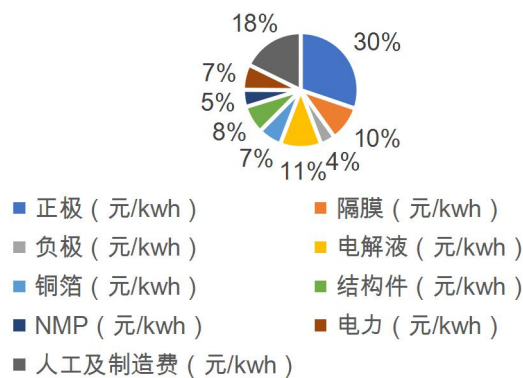


图 D-2. NCM11 电池成本占比情况图

NCM523成本占比情况

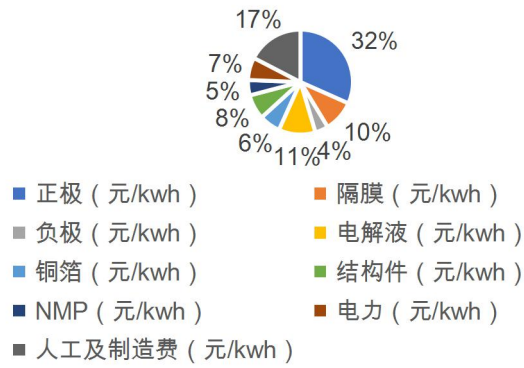


图 D-3. NCM523 电池成本占比情况图

NCM811 成本占比情况

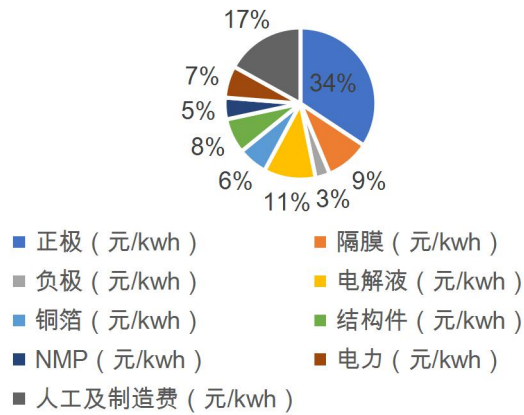


图 D-4. NCM811 电池成本占比情况图

NCA 成本占比情况

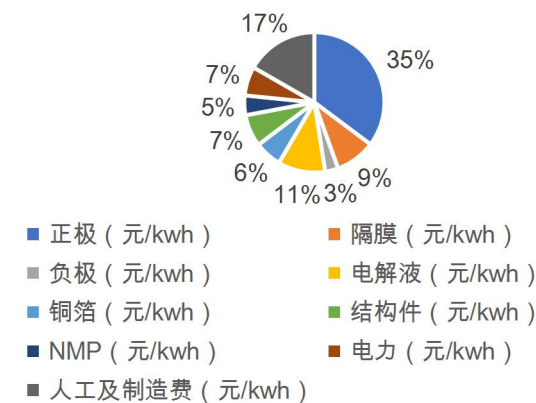


图 D-5. NCA 电池成本占比情况图

其他参考文献：锂电池基础科学问题_化学储能电池理论能量密度的估算（彭佳悦、组晨曦、李泓）

E. 梯级利用可行方向与潜力

1. 梯级利用技术可行性

动力电池的梯级利用首先面临的是电池的分档和筛选问题。与新电池相比，回收的动力电池一致性较差^[14]。由于车载使用阶段动力电池系统空间狭小，电池热场分布和热管理的有效性直接影响到摆放在不同位置上的电池温度差异、自放电差异等多重因素，使得报废的动力电池老化状态存在不一致性^[15]。单体电池之间的性能不一致，将严重影响电池组的性能发挥^[16]，因此在对动力电池进行重新组合时如何进行简单、可靠的普适性分选是首先要面临的问题。鉴于此，对于电池的梯级利用，会面临比较严苛的质量检查和筛选、重组过程以及一致性检测，以保证重组电池的技术指标、安全性、稳定性等符合要求。常见的筛选方法是采集锂离子单体电池容量、放电平均电压及满电态时电池的内阻作为基础数据，对电池进行筛选、分档和配组^[17]。但即便如此，重组过后的动力电池其一致性仍存在高低之分。如何降低报废的动力电池进行梯级利用时性能不一致的影响，提高筛选精度，一直都是研究的重难点。（郑方丹等，2015）^[18]以功率、内阻、容量、极化、放电温升、充电温升、开路电压和自放电率为评价指标，基于德尔菲法和灰色关联度模型，构建了动力电池综合性能评价模型。（Jiang et al. 2017）^[19]运用容量增量法和容量增量峰值区域分析，构建了对梯级利用电池组的一致性估计方法，并且给出了相应的电池筛选策略。

另一个进行梯级利用的关键技术难点是动力电池的拆解问题。废旧动力电池在拆解过程中，由于材料、残余电量等原因，在高温、压力、电火花等因素下，操作不当很可能引发电池的自燃甚至爆炸^[20]。此外，国内动力锂电池型号众多，电池包结构不统一，模组连接方式和工艺技术各不相同，意味着不可能用一套拆解流水线适合所有的动力电池，故目前国内报废的动力电池主要仍依靠人工进行拆解^[21]。这既提高了梯级利用的技术难度，也提高了再次利用的成本。将于2017年12月1日开始实施的《车用动力电池回收利用拆解规范》（GB/T 33598-2017）对废旧动力电池回收利用的安全性、作业程序、存储和管理等方面进行了严格要

求，规范了我国车用动力电池的回收利用及拆解、专业性技术及动力电池回收体系，在一定程度上会解决行业性的发展难题。此外，《电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸》（GB/T 34013-2017）将于 2018 年 2 月 1 日推行，该项标准对动力电池单体、模块和标准箱尺寸做出详细的规范，并对三种外形电池（圆柱形、方形和软包电池）分别提出直径、宽度、厚度、极柱高度、极柱位置等技术参数要求，为报废动力电池的进行规模化的流水线式拆解作业提供了有利条件。

2. 梯级利用主要市场方向

从市场方面考量，报废的动力电池在梯级利用后重新组配的电池组，其竞争力、性价比及收益分析也是重要因素。目前国内外进行动力电池梯级利用的主要目标市场均为储能市场。锂离子电池作为储能媒介，具有容量大、能量密度高、效率高等特点，非常适合用于储能系统的运行^{[22][23]}。但是，电池高昂的锂电池成本成为了动力电池用于储能系统的最大障碍^[24]。（Neubauer et al.2011）^[25]和（Neubauer et al.2012）^[26]通过研究得出，对车载动力电池进行二次利用可以显著降低锂电池用在储能领域的成本。目前车载动力电池作为电力储能的介质通常有两种途径：一是采取 V2G（Vehicle-to-grid）模式，通过电动汽车接入电网，使得电动汽车内的车载动力电池作为储能功能^{[27][28]}，实现储能目的；二是对报废的车载动力电池进行梯级利用，重组成安全、有效的电池组作为储能系统。目前 V2G 技术面临许多巨大挑战^[29]：一方面，V2G 模式将会增加车载动力电池充放电的循环次数，从而会降低动力电池的车用阶段使用寿命，进而增加电动汽车的生命周期成本；其次，连接至电网时，电池的充放电循环方式和放电深度等与电池在电动汽车内的相关性能设计是截然不同的，与此同时，大量 V2G 接入电网对于维持和控制电网的稳定性将是巨大挑战；此外，将车载电池接入 V2G 系统，可能违反了电动汽车维修保养的相关条例而产生售后环节的分歧。相比而言，利用报废动力电池重组的储能系统，则可有效避免上述挑战，还可提供连续不断的储能服务。（刘仕强等，2016）^[30]的研究表明，常规循环中放电容量衰减至初始容量的 80%的动力电池可以继续用于电网储能领域，以初始容量的 40%为寿命终结点时，可继续使用约 800 天。美国西北太平洋国家实验室的 Viswanathan 和 Kintner-Meyer 研究了动力电池在电网系统中二次利用的经济效益问题^[31]。通

通过对电池健康状态（SOH）的计算，电池在电网系统中工作运行状态的模拟，电动汽车一次利用和电网系统二次利用的经济收益的模拟计算，发现动力电池所处的 SOH 状态、二次利用的收益率、一次/二次利用的电池使用时间分配等因素都会影响电池的整体收益，因此为了得到最大化的电池整体价值，需要综合考虑电池的状态以及二次利用领域的要求和经济价值。(LIH, et al., 2012; WENCHEN, et al., 2012)^{[32][33]}分析了锂电池使用寿命与使用成本关系的问题，设计了一种最佳商业模式，用实例说明了 20 年使用寿命的锂电池组（电动汽车使用 5 年、储能系统使用 15 年），通过经济效益模型的优化，实现了一定的利润率。

F. 动力电池回收再生利用经济分析

1. 回收拆解技术发展现状

(1) 磷酸铁锂电池回收拆解方式

目前，废旧磷酸铁锂电池的回收方法主要有 2 种，一种是以回收重金属为目的，主要以回收锂为主；另一种是再生磷酸铁锂正极材料。

a) 湿法回收锂和铁

此类工艺以回收锂为主，因磷酸铁锂不含有贵金属，故对钴酸锂的回收工艺进行改造，主要工艺流程如图 F-1 所示。

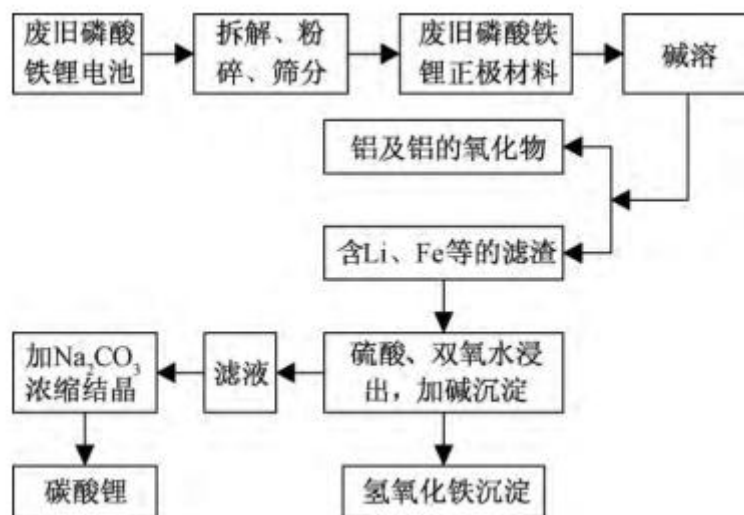


图 F-1 湿法回收锂和铁工艺流程

首先将磷酸铁锂电池拆解得到正极材料，粉碎筛分得到粉料；之后将碱溶液加入到粉料中，溶解铝及铝的氧化物，过滤得到含锂、铁等的滤渣；将滤渣用硫

酸与双氧水(还原剂)的混合溶液浸出，得到浸出液；加碱沉淀氢氧化铁，过滤得到滤液；灼烧氢氧化铁，可得氧化铁；最后调节浸出液的 pH 值(5.0 ~8.0)，过滤浸出液得滤液，加固体碳酸钠浓缩结晶得碳酸锂。

根据废旧电池回收处理企业专家和技术人员经验，采用机械法和湿法回收废旧磷酸铁锂电池，材料回收率按照计算，回收处理 1t 废旧磷酸铁锂动力电池的成本要高于再生材料的收益。比如一家采用机械法和湿法回收废旧磷酸铁锂电池的公司，回收处理 1 吨废旧磷酸铁锂动力电池成本为 8540 元，而再生材料收益仅为 8110 元，亏损 430 元。由于锂离子电池回收技术路线比较复杂，回收工艺成本高，而除了三元系正极回收价值高外，像锰酸锂、磷酸铁锂系正极回收价值偏低。

b) 再生磷酸铁锂

单一回收某种元素使得不含有贵金属的磷酸铁锂产生的经济效益比较低。因此，目前主要是固相法再生磷酸铁锂处理废旧磷酸铁锂电池，此工艺具有很高的回收效益，且资源的综合利用率高。主要工艺流程见图 F-2。

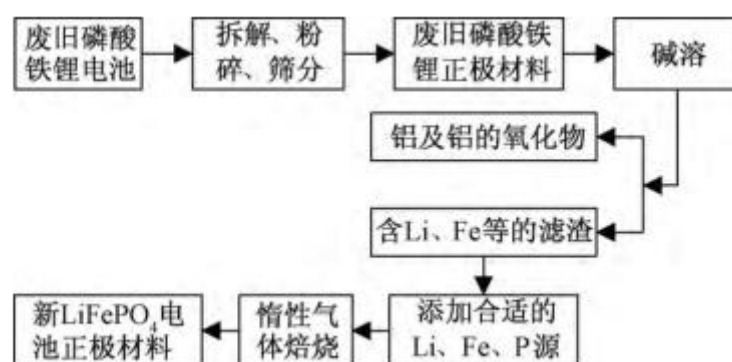


图 F-2 固相法再生磷酸铁锂工艺流程

首先将磷酸铁锂电池拆解得到正极材料，粉碎筛分得粉料；之后热处理去除残留的石墨和粘结剂，再将碱溶液加入到粉料中，溶解铝及铝的氧化物；过滤得含锂、铁等的滤渣，分析滤渣中铁、锂、磷的摩尔比，添加铁源、锂源和磷源，将铁、锂、磷的摩尔比调整为 1: 1 : 1；加入碳源，球磨后在惰性气氛中煅烧得到新的磷酸铁锂正极材料。

(2) 三元锂电池回收拆解方式

废旧三元锂电池的回收思路跟磷酸铁锂电池基本一致，主要为三元锂电池中 Co、Ni、Mn、Li、Al、Cu 及电解液中有机溶剂等多种有价材料的回收和再生电池正负材料这两种思路。

有价材料回收的主要方法为经过预处理后，通过溶解、萃取、沉淀、电解等以单质、化合物或混合物的形式分类回收各种有价材料。再生电池正负材料的主要方法为，经过预处理后，通过溶解、萃取、沉淀等处理后加入 MnSO₄、NiSO₄、CoSO₄ 等物质调整溶液中各种材料的比例，直接用于制备锂离子电池正负极材料。

2. 回收拆解成本收益

(1) 回收收益

废旧动力电池中含有钴、镍、锂等具有回收价值的金属，且数量可观的。动力电池的回收收益主要是对动力电池中有价值的金属的回收。我们通过建立数学模型来计算动力电池的回收收益：

$$R = \sum P \times \alpha \times \beta \quad (1)$$

其中， P —各种金属价格

α —各种金属含量

β —各种金属的回收效率

本文中，我们通过动力电池正极材料数来测算动力电池的正极材料回收价值，通过查阅文献测算出铜和铝的回收量。

表 F-1 动力电池正极材料数

	LFP	NCM111/333	NCM52	NCM62	NCM81	NCA
			3	2	1	
1KWh 所需材料数 (kg/KWh)	2.03	1.80	1.69	1.59	1.50	1.42

据高工产业锂电研究所(GGII)调研数据显示，高镍三元材料的占比持续上升，2016 年国内 NCM622、NCA 型在三元材料总产量的占比超过 5%，当前国内三元材料仍超过 75%为 NCM523^[34](含容量型和倍率型)。所以，下文在回收收

益、成本和回收利润测算中，三元系电池我们以 NCM523 动力电池的数据代表。

表 F-2 磷酸铁锂和三元动力电池回收收益

金属	价格 ^[35] (元/吨)	成分 (kg/ton 100KWH)		回收效率 ^[16]	回收收益 (元/100KWH)	
		LiFePO ₄ ^[36]	三元电池 ^[37]		LiFePO ₄	三元电池
钴	443000	0	48.48	89%	0	19114.21
镍	98275	0	80.8	62%	0	4923.18
锂	860000	8.99	9.59	80%	6185.12	6597.92
锰	10900	0	30.13	53%	0	174.06
铁	660	71.95	0	52%	24.69	0
铝	15380	65	87	42%	420	562
铜	53510	82	112	90%	3949	5394
总计					10578.81	36765.38

在表 5.2 中，各种金属价格来自于 2017 年 11 月 13 日上海有色金属网提供的数据 (<https://hq.smm.cn/g1>)。本文采用的回收效率主要是回收效率较优值或者是实验室小试水平上的回收效率，对比起实际工业水平上的回收效率来说可能较偏高。

由于一辆新能源汽车需要 50KWH 动力电池，大约为 500kg。所以，磷酸铁锂和三元锂电池的回收收益为：10578.81 元/吨和 36765.38 元/吨。

(2) 回收成本

废旧动力电池回收成本分为两个部分：可变成本 (C_U) 和固定成本 (C_D)。动力电池的可变成本和固定成本与动力电池处理量、回收技术水平、地理位置等都很多因素都有关系。由于中国电动汽车动力电池还未达到批量报废的阶段，现阶段，许多动力电池回收处理单位收集不到足量的废旧电池包，导致目前国内还没有正规的规模化的动力电池回收处理企业在稳定运行，这对成本测算来说就造成了极大的困难。

Wang Xue 等通过查阅文献，列举出国际上 15 个动力电池回收的可变成本和

固定成本，统计出可变成本平均值为 2800 美元每吨，但由于样本主要是澳大利亚、美国、法国等发达国家，与中国国情有所差别。侯兵对国内的动力电池企业进行调研，结果表明，包括回收成本与可变成本，总成本为：18500 元/吨。但由于侯兵在计算动力电池成本时并未考虑不同动力电池类型在原材料成本和回收工艺的不同，也没有考虑仓储费用和运输费用，所以，计算结果与实际值略有偏差。

本文结合文献所述以及本课题组对企业的调研情况，分别测算出磷酸铁锂和三元锂电池的可变成本和固定成本。

在设备折旧费用中，采用年限平均法计提折旧，计算公式为：

$$\text{设备折旧成本} = \frac{C_0 \times (1 - r)}{n}$$

其中， C_0 为总固定资产值，包括厂房建设投资、机器设备购买与安装、回收网络建设等。

r 为固定资产的残值率，一般定为 5%；

n 为固定资产使用年限，一般定为 10 年。

表 F-3 动力电池回收处理设施投资费用

总投资（元）	处理能力（年/吨）	设备折旧费（元）	平均折旧费（元）	国家	文献来源
165782500	25000	15749338	630	Italy	Joint Venture(2011)
111405840	22000	10583555	481	US	GarbOilPower(2010)
663130000	200000	62997350	315	Edmonton	(2012)
994695000	132000	94496025	716	South Carolina	Content(2012)
994695000	176000	94496025	537	Mexico	Roell(2011)

（注：总投资依据汇率（人民币：美元汇率）6.6313 元计算得出。）

综上所述，动力电池的成本如下表，

表 F-4 动力电池成本

	项目	内容	成本（元/吨）	
			磷酸铁锂	三元电池
Cu	原材料成本	废旧锂电池	0	12018（以镍、钴价值 50%计）
	辅助材料成本	酸碱溶液、萃取剂	2500	2500

	燃料动力成本	电、天然气等	620	620
	预处理费用	破碎分选	500	500
	环境处理费用	废水排放	330	330
		残渣和灰烬	120	120
	人工费用	人工费用	470	470
	运输费用	运输费用	2000	2000
C _D	设备费用	设备维护费	100	100
		设备折旧费(根据文献平均值)	536	536
总计			7176	19194

在动力电池回收利用设备满负荷的情况下，每吨动力电池固定成本最低，此时的磷酸铁锂总成本为 7176 元，三元锂电池总成本为 19194 元。

(3) 回收利润

回收利润通过公式 (3) 计算得出，

$$B = R - C_U - C_D$$

其中，B 为动力电池回收利润

R 为回收收益

C_U 为可变成本

C_D 为固定成本

在动力电池回收处理设备满负荷的情况下，磷酸铁锂电池和三元锂电池回收处理都是盈利的，磷酸铁锂盈利为 3394 元/吨，三元电池盈利为 17571 元/吨。

表 F-5 动力电池回收利润

类型	B (元/吨)	R (元/吨)	C _总 (元/吨)
磷酸铁锂	3394	10570	7176
三元电池	17571	36765	19194

动力电池的回收利润与金属价格有着密切的关系，现阶段，若动力电池价格下降 32%，处理设施满负荷处理废旧磷酸铁锂电池仍能达到收支平衡。

由于目前我国动力电池未达到批次报废的等级，许多动力电池回收处理商无法回收到足量的废旧动力电池包运营动力电池回收处理设备，所以，在现阶段，动力电池回收处理企业的固定成本会较高，可能难以盈利。但随着动力电池规模化报废，且动力电池回收渠道正规化、合理化，动力电池回收处理企业将能够在动力电池回收板块中获取相应的利润。

参考文献

- [1] 汪泽波. 当前油价和补贴政策对中国新能源汽车产业发展的影响——基于 Stackelberg 模型分析[J]. 中国石油大学学报(社会科学版). 2015(06)
- [2] 高玉冰,毛显强,杨舒茜,吴烈,董刚.基于 LCA 的新能源轿车节能减排效果分析与评价[J]. 环境科学学报. 2013(05)
- [3] 盖世汽车网. 5 年数据宣告中国新能源汽车插混过渡阶段进入倒计时. [2017-7-20]. <http://auto.gasgoo.com/News/2017/07/21064247424770018664C501.shtml>
- [4] 侯兵.电动汽车动力电池回收模式研究[D].重庆:重庆理工大学,2015.
- [5] 彭结林.报废动力电池回收预处理方案及技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [6] 环境保护部科技标准司, 中国环境科学研究院, 清华大学. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南.北京: 中国环境保护部, 2014.
- [7] 何立强, 胡京南, 解淑霞等.2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单 [J].环境科学研究,2014,27(1): 28-35
- [8] Huo H, Zhang Q, He K, et al. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend [J]. Energy Policy, 2012,43(3):6-16.
- [9] J.F. Peters et al. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 491–506
- [10] Stenzel P, Baumann M, Fleer J, Zimmermann B, Weil M. Database development and evaluation for techno-economic assessments of electrochemical energy storage systems. In: Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International; 2014, p. 1334–42.
- [11] S.J. Gerssen-Gondelach, A.P.C. Faaij. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. Journal of Power Sources 212 (2012) 111-129
- [12] 新浪汽车. 让世界看到中国速度 宁德时代打造零事故电池. [2016-12-19]. <http://auto.sina.com.cn/news/ct/2016-12-19/detail-ifxytqax6571238.shtml>
- [13]第一商用车网. 崔东树: 新能源车免车购税第九批目录分析. [2016-11-28]. <http://auto.gasgoo.com/News/2016/11/28102747274770001795416.shtml>
- [14] 韩路与贺狄龙等 (2014).“动力电池梯次利用研究进展.”电源技术 38 (3) : 548-550
- [15] 刘颖琦与李苏秀等 (2017).“梯次利用动力电池储能的特点及应用展望.”科技管理研究 (1) : 59-65
- [16] 靳尉仁与庞静等 (2014).“锂离子动力电池一致性评价方法的研究进展.”电池 44 (1) : 53-56
- [17] 杨金亮与刘兴波等 (2016).“动力电池 PACK 一致性探讨.”重型汽车 12 (6) :19-20
- [18] 郑方丹与姜久春等 (2015).“基于筛选配组应用的动力电池综合性能评价方法研究.”系统工程理论与实践 (2) :528-536
- [19] Jiang, Y., and Jiang, J.C., et al. (2017). “Recognition of battery aging variations for LiFePO₄ batteries in 2nd use applications combining incremental capacity analysis and statistical approaches.” Journal of Power Sources 360, 180-188
- [20] Mikolajczak, C., and Kahn, M. (2011). “Lithium-ion batteries hazard and use assessment.” Fire Protection Research Foundation, Washington, DC.
- [21] 沙亚红与何挺等 (2016).“动力电池自动拆解设备的设计.”南方农机 (5) :77-78
- [22] LI J. and DANZER, M.A. (2014). “Optimal charge control strategies for stationary photovoltaic battery systems.” Journal of Power Sources 258: 365-373
- [23] Satpathy, A.S. and Kishore, N.K., et al. (2014).“Control scheme for a stand-alone wind energy conversion system.” Energy Conversion, IEEE Transactions 29(2): 418-425
- [24] Heymans, C., and Walker, S. B., et al. (2014). “Economic analysis of second use electric

- vehicle batteries for residential energy storage and load-leveiling.” *Energy Policy* 71: 22-30
- [25] Neubauer, J.S. and Pesaran, A. (2011). "The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications." *Journal of Power Sources* 196(23): 10351-10358.
- [26] Neubauer, J.S. and Pesaran, A., et al. (2012). "A techno-economic analysis of PEV battery second use: repurposed-battery selling price and commercial and industrial end-user value." *SAE World Congress* 24-26
- [27] Peterson, S.B., and Apt, J., et al. (2010). "Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization." *Power Sources* 195, 2385-2392
- [28] Yilmaz, M., and Krein, P.T. (2013). "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and interface technologies." *IEEE Trans. Power Electron.* 28(12), 5673-5689
- [29] Heymans, C., and Walker, S. B., et al. (2014). "Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-leveiling." *Energy Policy* 71: 22-30
- [30] 刘仕强与王芳等 (2016). "磷酸铁锂动力电池梯次利用可行性分析研究." *电源技术* 40 (3) : 521-524
- [31] Viswanathan, V. V. and M. Kintner-Meyer (2011). "Second Use of Transportation Batteries: Maximizing the Value of Batteries for Transportation and Grid Services." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60(7): 2963-2970.
- [32] Lih, W. and J. Yen, et al. (2012). Second Use of Retired Lithium-ion Battery Packs from Electric Vehicles: Technological Challenges, Cost Analysis and Optimal Business Model, *IEEE*: 381 – 384.
- [33] WenChen, L. and Y. JiehHwang, et al. (2012). "Second-use Applications of Lithium-ion Batteries Retired from Electric Vehicles: Challenges,
- [34] 高工产研网. 高镍三元电池渐成主流 电池企业积极布局为何集体“难产”? . (Retrieved from: <http://www.gg-ii.com/gg/cygc/dldc/20160922/773.html>)
- [35] Shanghai Nonferrous Metals Network, 2017. Spot Bidding Module. (Retrieved from:<https://hq.smm.cn/gl>).
- [36] Xue Wang, Gabrielle Gaustad , Callie W. Babbitt, Kirti Richa. Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling* 83 (2014) 53–62
- [37] Xue Wang, Gabrielle Gaustad, Callie W. Babbitt a , Chelsea Bailey a ,Matthew J. Ganter, Brian J. Landi. Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream. *Journal of Environmental Management* 135 (2014) 126-134