

doi: 10. 20242/j. issn. 2097-5384. 2025. 06. 021

退役动力电池回收体系政策与技术发展研究

袁文辉, 张学东

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要: 退役动力电池回收环节是我国动力电池循环利用产业链良性发展的关键堵点。为研究畅通回收渠道的举措, 提升资源回收环节的工作效率和效益, 梳理了近十年来国内外相关的政策, 研究了政策的发展态势; 并总结分析了面向退役动力电池回收环节的生态友好型设计、快速状态检测与评估技术、智能化拆解技术与装备、信息化与溯源管理等技术新进展及发展趋势。通过严格执行政策和监管发力, 完善商业模式, 提升回收技术水平, 预期可规范回收体系, 市场集中度将显著提升, 电池回收有望成为具有显著规模经济效益的战略性新兴产业。

关键词: 退役动力电池; 回收体系; 生态友好型设计; 快速检测评估; 智能化拆解; 信息源

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-5384(2025)06-1081-06

Research on Policy and Technological Development of the Retirement Power Battery Recycling System

YUAN Wenhui, ZHANG Xuedong

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: The recycling of retired power batteries is a critical bottleneck for the healthy development of China's battery recycling industry chain. To investigate measures for unblocking recycling channels and enhancing operational efficiency and economic viability in resource recovery, the domestic and international policies over the past decade were reviewed, and their evolutionary trends were analyzed. Furthermore, the latest technological advancements and future trends in Eco-friendly design, rapid state detection and evaluation, intelligent dismantling technology and equipment, and information traceability management for retired battery recycling were synthesized. Through rigorous policy enforcement, the regulatory oversight is enhanced, the business models are optimized, and the recycling technologies are elevated, the recycling ecosystem is projected to standardize, with market consolidation accelerating significantly. The battery recycling is expected to become a strategic emerging industry with significant economies of scale.

Key words: retired power batteries; recycling system; eco-friendly design; rapid state detection and evaluation; intelligent dismantling; information traceability

截至2024年底,我国新能源汽车保有量已达3 140 万辆,2025年2月新能源车国内零售渗透率为49.5%,同比提升15个百分点^[1],产业发展迅猛。同时,我国新能源汽车动力电池已逐步进入规模化退役

阶段^[2],2025年将迎来104 万t退役动力电池,预计2030年将达到350 万t,动力电池退役的高峰期即将到来,因此全面提升动力电池回收利用能力和水平显得尤为重要。图1为动力电池全生命周期示意图。

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 工信部专项“战略性矿产资源产业基础数据公共服务平台”项目(TC220A04S)

Fund: MIIT Project: Public Service Platform for Basic Data of Strategic Mineral Resources Industry (TC220A04S)

作者简介: 袁文辉(1970—),男,博士,正高级工程师,研究方向为有色金属冶金及资源循环利用。

引用格式: 袁文辉,张学东. 退役动力电池回收体系政策与技术发展研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(6): 1081-1086.

YUAN Wenhui, ZHANG Xuedong. Research on Policy and Technological Development of the Retirement Power Battery Recycling System[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(6): 1081-1086.

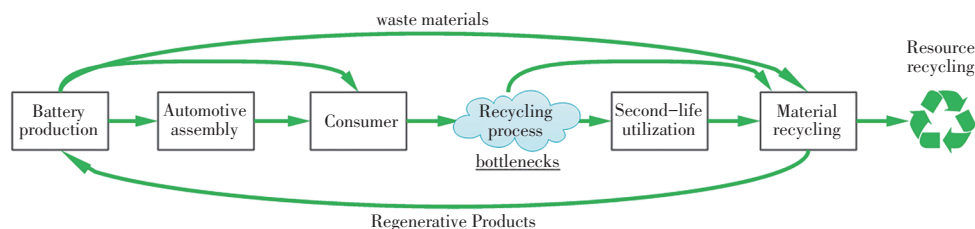


图1 动力电池全生命周期示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the full life cycle of power batteries

在动力电池全生命周期的生产、消费、回收、梯次利用和循环利用各环节中,动力电池的产能在节节攀升;新能源汽车消费市场正井喷式增长;国家已培育了5批共148家梯次利用和循环利用的白名单企业,白名单企业年处理能力达379万t,全国327个地市级行政区有工信部备案的回收网点超1.5万个,已形成了规模化处置的产业集群^[3],再生利用技术已有较多研究,技术储备相对成熟^[4]。然而在其中的回收环节,据国务院发展研究中心的报告显示动力电池规范化回收率却不足25%,一些缺乏生产资质和技术积累的小作坊扰乱市场秩序,超七成退役动力电池进入“黑市”交易,“劣币驱逐良币”导致大批白名单企业面临“吃不饱”的困境,回收环节已成为动力电池循环利用产业链的关键堵点。因此,健全和完善废旧动力电池回收体系,以政策规范和技术提升的手段来畅通回收环节,已是行业健康和可持续发展的迫切需求。

1 政策发展及态势

新能源汽车近十年来发展迅速,动力电池循环利用的国内外政策、规范、标准也在同步健全完善。

1.1 国内政策

2016年,国家出台了《生产者责任延伸制度推行方案》《电动汽车动力电池回收利用技术政策》等文件,明确了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。2018年1月,工业和信息化部、科技部等部委发布了《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》,明确了在新能源汽车动力蓄电池回收利用的生产、使用、利用、贮存及运输过程中产生的废旧动力蓄电池应按照要求回收处理,强调落实生产者责任延伸制度,汽车生产企业承担动力蓄电池回收的主体责任。工业和信息化部自2018年起通过发布梯次利用、拆解回收和两者兼有双资质的“白名单”制度,扶持合规的电池回收再利用企业,并实施动态监管和退出机制;到2024年共有5批148家企业,覆盖21个省市,江西、湖南、安徽、广东等省份

集中度较高,基本能够实现“就近回收、就近处置”,江西赣州、湖南长沙等地区已形成动力电池综合利用产业集群。2024年3月,工业和信息化部暂停了动力电池回收“白名单”企业的受理申报,防止资本无序重复扩张,提高白名单企业资质的含金量;12月发布了《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件(2024年本)》,《规范条件》进一步优化技术指标体系,更新完善标准规范,强化产品质量管理,以及规模和产能、研发费用占比等要求;还增补了相关拆解、编码标准,明确了企业应建立产品可追溯、责任可追究的质量保障机制,要求沿链传递,进一步推动行业规范发展。2025年2月,国务院审议通过《健全新能源汽车动力电池回收利用体系行动方案》,首次从全链条管理、数字化追溯、法治监管三方面系统性规范行业,要求对动力电池实施“全生命周期数字化追溯”,以提升回收利用的规范性和效率;同时也明确新能源汽车企业需在车辆准入时提交电池回收方案。

我国新能源汽车动力蓄电池回收利用相关政策近十年呈现系统性升级和逐步规范完善的过程,形成了“法律法规-行业规范-监管措施”三级体系。期间国家制定拆解规范、梯次利用等20余项技术标准规范,推动回收流程标准化。

1.2 国外政策

日本提出“3R(Reduce, Reuse, Recycle)倡议”,以企业主导模式为核心,通过立法明确生产商为回收责任主体,建立“生产-销售-回收-再生”闭环体系,并依托零售商、加油站网络构建回收渠道,同时政府提供资金补助以提升积极性。德国强化生产者责任延伸制度,依据欧盟《电池回收指令》要求电池企业登记并承担主要回收责任,消费者需将废旧电池交至指定回收点,同时通过押金制度和基金支持完善市场化回收网络。美国以市场调节为主导,政府通过环保标准约束行业,非营利组织如PRBA推动公众参与;特斯拉公司依托销售网络构建逆向物流体系,并自建回收工厂实现电池回收利用。欧盟通过的

《新电池法》(EU 2023/1542)要求电动汽车电池需要有数字电池护照,电池生产商承担回收责任,法规明确要求所有类型的电池在生命周期结束时必须能够被有效地回收和再利用,电池制造商在产品阶段就考虑回收利用,确保电池易于拆卸、回收和再利用,整个产业链都要参与到碳足迹和数字电池护照等管理系统中,并明确了分阶段的最低收集目标。

国外新能源汽车动力电池回收利用普遍强调全生命周期管理,通过立法强制、生产者责任延伸制度、标准规范国际合作互认、市场机制和公众参与等差异化路径,逐步实施电池护照、碳标签制度,推动绿色供应链建设和协同布局,以应对资源循环利用与碳减排的双重挑战。

1.3 政策发展态势分析

我国退役动力电池回收体系的政策框架在逐步完善,市场格局初具规模,但目前规范企业经营困难的情况依然严峻。天眼查数据显示,截至2024年底,我国现有16.6万家动力电池回收相关企业,且大多为小微企业,回收行业整体面临“小、散、乱”的问题,这种市场格局加剧了不规范竞争的激烈程度。图2为中国2014—2024年动力电池回收相关企业注册量。

通过加大市场监管和违规惩处力度、加强对责任主体的激励和约束力、进一步提升技术标准和环保的准入门槛、引导有序投资、强化产业链上下游协

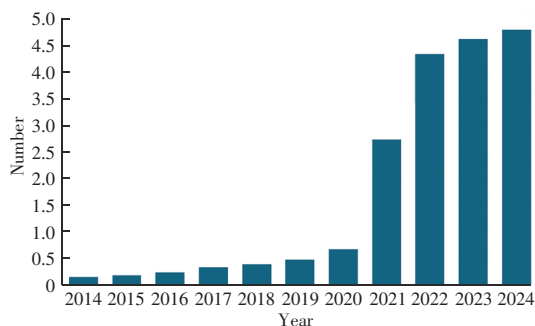


图2 中国2014—2024年动力电池回收相关企业注册量(单位:万家)

Fig. 2 Number of registered enterprises related to power battery recycling in China from 2014 to 2024 (Unit: ten thousand enterprises)

同等严格执行政策和监管发力,可以达到行业规范和可持续发展的目标。

回收的商业模式按整车企业、电池生产企业、第三方专业回收利用企业的不同主体可分成三类,表1对比了各自的优缺点。从落实生产者责任延伸制、行动方案等政策实施的角度考虑,由整车企业牵头,组织产业联盟的回收模式将是今后的重要发展方向。同时,探索回收商业模式多元化,如保险业可探索推出回收责任险种,提升回收责任主体的积极性;通过实施提振消费专项行动方案等政策,开展“以租代售”、“共享回收平台”等试点,可提升消费者的参与度。

表1 退役动力电池回收的主要商业模式

Table 1 Business models of retired power batteries recycling

Business model	Typical enterprises	Advantage	Shortage
Automobile manufacturers+alliance recycling model	Tesla/BYD	Extended Producer Responsibility (EPR) policy priority support, recycling channels standardized and convenient, enhanced synergistic efficiency, and reduced recycling costs	Inadequate recycling technology reserves, complex coordination challenges in cross-enterprise alliances, and the need to balance multiple interests
Battery manufacturer closed-loop recycling model	Contemporary amperex Technology Co., Limited (BAMP Cycle Technology)	Deep technological accumulation, closed-loop integration with new vehicle production, high recycling efficiency, and economies of scale	Necessity to independently establish a recycling network, high initial capital expenditure
Third-party specialized enterprise recycling model	GEM/Aibo Green	High professional technical level, strong flexibility, broad market coverage, and swift market demand response	Diverse and fragmented recycling channels, uneven pre-treatment technology levels, and exposure to irregular competition from small workshops

2 技术发展趋势

在政策保障的同时,回收行业也需不断提升和发展新技术,为行业健康发展注入新质生产力。着眼畅通回收渠道,提升退役动力电池回收环节的工作效率和效益,需重点开展生态友好型设计、快速状态检测与评估技术、智能化拆解、信息溯源等技术研究与应用。

2.1 生态友好型设计

动力电池种类繁多,结构复杂,设计准则不统一,连接形式多样,更新迭代快,因而使回收拆解工艺差异较大,处理过程复杂且难度较高,导致回收企业难以形成标准化、自动化的生产线。在电池设计和选型、组装时就考虑后续梯次利用和回收的便利性,采用标准化、通用性及易拆解的生态友好型产品结构,通过模

块化设计,提高回收率和降低回收成本;在电池制造过程中选择可回收和环境友好的材料,减少有害物质的使用,降低回收环节的污染隐患。

1) 模块化与简化设计,降低拆解复杂度。研究表明,电池包模块数量与拆解成本呈正相关,减少模块层级有助于拆解。例如,特斯拉Model S Plaid电池仅含5个模块,拆解效率显著高于传统多模块设计;比亚迪的CTP刀片电池通过无模块设计,零件数量减少40%,拆解成本明显降低^[5]。电池模组优先选择空气冷却而非液冷系统,液冷系统虽然冷却效率更高,但其复杂的管路结构增加了拆解和维护难度,尤其在模块需要频繁拆解的场景,空冷的优势更为明显^[6]。在保障电池安全使用性前提下,采用易拆解结构设计,如机械压接、插槽式快拆结构、可逆粘合材料等可逆连接技术替代焊接,无需工具即可完成电池盖拆卸,这种设计避免了模块间复杂的连接结构,简化了回收流程,预先拆解分离与粉碎电极材料相比可以节省高达70%成本^[7]。也有电池直接集成到车辆框架中的设计(如CTC)虽然提高了整体性能和经济性,但结构集成增加了拆解难度,会对维修和回收产生不利影响,设计时需考虑匹配全生命周期可持续性要求。

2) 接口与尺寸标准化,提升拆解产能。目前全球动力电池型号超过5 000种,结构差异导致人工拆解、分选效率低下,难以形成规模效应。标准化设计有助于实现回收的自动化工具通用性,可以显著提高电池回收的效率和经济性,固态电池等新产品更应该尽快制定统一标准。我国已着手制定《电动汽车用动力蓄电池产品推荐规格尺寸》标准,鼓励整车厂选用推荐系列中的规格尺寸,以引导尺寸向少型化发展;但目前电池包尺寸仍以车企定制为主,不同品牌接口协议尚未统一,制约了换电和回收的便利性。

3) 使用环保材料,促进形成产业链绿色生态。环保型黏合剂不仅减少了有害物质的使用,还增强了其安全性和可靠性,绿色生态制造技术将在电池产业健康发展中发挥越来越重要的作用。水性粘合剂如聚四氟乙烯(PTFE)因其无毒、环保且干燥过程低能的特点,被广泛应用于锂离子电池制造中^[8]。

2.2 快速状态检测与评估技术

梯次利用作为动力电池回收利用的首选方向,在储能系统、基站备电、低速电动车、分布式微电网等梯次产品应用场景能够充分发挥电池的剩余价值。国内已形成较为完善的梯次利用标准体系,GB/T 34015系列标准包括《车用动力电池回收利用 梯次利用》,

涵盖余能检测、拆解规范、包装运输、产品标识等多个方面。《梯次锂离子电池使用标准》规范了退役动力电池在储能系统中的应用,提高了储能系统的性能和安全等级。尽管梯次利用技术已取得一定进展,但仍面临准确预估电池剩余寿命、筛选分类、重组兼容、系统集成等技术难题,造成梯次利用的成本高,存在风险隐患。因此,在快速容量检测、寿命预测模型、标准化分选等方面需深入研究。

1) 快速容量检测和寿命预测技术。主要包括容量衰减、内阻变化等关键指标的检测和分析,快速评估退役动力电池健康度、安全性、残值和梯次利用场景适用性。动力电池快速容量检测技术的主流方法主要包括:充电曲线法、增量容量曲线法、电化学阻抗谱(EIS)法、物理(红外热成像、声波或磁场)无损检测法、片段充电数据法、倍率放电测试法、预设速率放电测试法、基于数据驱动模型预测法等,未来发展趋势是采用非破坏性检测技术、数据分析与智能算法,以数据驱动提高检测的准确性和效率,进行实时健康评估和预测^[9]。

2) 标准化分选技术。按照《车用动力电池成组及评价分级技术规范》(T/CES 117—2022)标准建立以容量、电压、内阻一致性为核心的电池评价分级体系,通过分级选别技术精准匹配电池梯次利用场景。主要分选方法有多参数静态分选法、动态电压特性法、多状态耦合法等^[10-11],目前的分选技术尚不成熟,且成本较高,难以大规模推广。随着人工智能、大数据和云计算等技术的发展应用,退役动力电池模组分选技术将更加智能化和自适应化,能够实现更精准的数据分析和预测,进一步提升分选效率和电池性能。

2.3 智能化拆解技术与装备

动力电池的智能化拆解是对接电池生态设计,突破拆解过程的人工依赖,能够实现规模化回收。

1) 柔性智能化拆解技术。退役动力电池柔性智能化拆解技术近年来取得显著进展,成为推动千亿级回收市场的关键驱动力。以AI、3D视觉和机器人协同为核心的柔性拆解系统已实现规模化应用。例如,格林美研发的智能产线可兼容50种以上电池包,拆解效率达13件/h,无损拆解良率超98%^[12];梅卡曼德机器人通过AI+3D视觉定位技术,解决了多型号电池包兼容性问题,拆解无需产线改造^[13]。越疆科技通过图像识别算法、机器学习、无损除胶工艺等技术创新,开展双臂机器人系统实现异型件精确识别与柔性分离研究。

2)智能分拣系统。退役动力电池拆解后基于机器视觉与深度学习的智能分拣技术已成为发展趋势,如特斯拉Optimus机器人通过增强视觉系统实现电池的精准分拣,其识别准确率达行业领先水平^[14]。迁移学习技术的应用(如BatSort系统)可通过小样本训练、AI算法泛化能力提升来实现多类别电池分类,不使用迁移学习技术的机器视觉分类准确率能达到近80%,而使用该技术后准确率可提高到96%,显示迁移学习技术在复杂电池分类中的重要性^[15]。物理分选与智能分拣相结合的趋势显著^[16],利用人工智能图像识别、机器视觉和自动化控制等技术,通过气流分选、振动筛分等环境友好的纯物理分选方法组合工艺实现铜箔、铝箔、隔膜等材料的有效分离,准确率超过98%。目前,我国的行业规范提高了资源回收率的产业指标,政策倒逼分拣技术需更精细化,推动企业研发应用高精度分选装备。未来分拣技术需兼顾标准化与柔性适配能力。

2.4 信息化与溯源管理

1)信息溯源系统。通过区块链、物联网模组实时采集电池全生命周期数据(如循环次数、温度历史),上链存储数据确保不可篡改,形成一个安全可靠的追溯平台,实现对动力电池全生命周期的透明化管理。2018年7月新能源汽车国家监测与动力蓄电池回收利用溯源综合管理平台启动应用,目前占全国产量94%的新能源汽车已纳入溯源管理,实现了动力电池来源可查、去向可追、节点可控。溯源系统中数据的准确性是关键,但实际应用中容易出现数据丢失、错误或不完整的问题,影响溯源结果的可靠性;同时溯源标准不一致,导致不同行业和企业间的数据无法交互。今后可采用多技术联用的方式,如结合物联网、区块链、RFID和同位素溯源等技术,弥补单一技术的不足,并建立统一的溯源标准,促进不同系统间的数据交互,打破信息孤岛,增强防伪能力。

2)智能仓储和物流系统。利用智能化仓储管理系统(MES)和总控调度系统,实现电池包的分类包装运输、仓储规范标准,系统具备高度的信息化和智能化,满足全流程的信息化溯源管理。基于大数据分析构建逆向供应链生态耦合,物联网(IoT)监控实时追踪废旧电池流向,优化回收网点布局与运输路径,可降低物流成本。通过建立标准化数据、自动化流程与协同化平台,运用跨系统数据交互、多流协同验证等技术,实现实物流、转移联单流、发票流三流合一,防止非法拆解或跨境走私。

3 展望

退役动力电池回收体系建设是新能源汽车产业可持续发展的重要保障,也是全球城市矿产资源竞争的战略制高点。我国动力电池退役规模呈现爆炸式增长,在此背景下,退役动力电池回收利用的政策监管体系将加速完善,政策趋严将促使行业进入洗牌期,以人工智能为代表的技术进步将重构产业格局。通过规范和完善回收体系,支撑白名单企业占据市场主导地位,市场集中度将显著提升,电池回收有望从环保责任转化为具有显著规模经济效益的战略性新兴产业,实现环境效益与经济效益的双重跃升,促进我国在全球新能源竞争中掌握战略主动权。

参考文献

- [1] 中国汽车流通协会乘用车市场信息联席分会.2025年2月份全国乘用车市场分析[R].上海:中国汽车流通协会乘用车市场信息联席分会,2025.
Passenger Vehicle Market Information Joint Committee of the China Automobile Circulation Association. Analysis of the national passenger vehicle market in february 2025[R]. Shanghai: Passenger Vehicle Market Information Joint Committee of the China Automobile Circulation Association,2025.
- [2] 牟思宇,谢宇斌.我国废旧动力电池回收利用的发展现状、存在问题及对策建议[J].有色金属工程,2022,12(12):153-158.
MOU Siyu, XIE Yubin. Current status, existing problems and development suggestions for recycling and utilization of waste power batteries[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(12): 153-158.
- [3] 中国工业节能与清洁生产协会.中国新能源电池回收利用产业发展报告2024[R].北京:中国工业节能与清洁生产协会,2024.
China Industrial Energy Conservation and Cleaner Production Association. China new energy battery recycling and utilization industry development report 2024[R]. Beijing: China Industrial Energy Conservation and Cleaner Production Association,2024.
- [4] 邓超群,王海北,周起帆,等.废锂电池有价金属回收研究现状[J].矿冶,2021,30(5):109-118.
DENG Chaoqun, WANG Haibei, ZHOU Qifan, et al. Research status of valuable metal recovery of spent lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 109-118.
- [5] JOHANNISSON A. Outlook of EV battery pack design trends[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2023.

- [6] FENG G A. Energeia Labs Power battery pack enclosure integrated with liquid cooling solution[R]. Singapore: Energeia Labs, 2018.
- [7] THOMPSON D L. Recycling of lithium-ion batteries [D]. England Leicester: University of Leicester, 2022.
- [8] WANG X H, CHEN S L, ZHANG K Q, et al. A Polytetrafluoroethylene-based solvent-free procedure for the manufacturing of lithium-ion batteries [J]. *Materials*, 2023, 16(22): 7232. DOI : 10.3390/ma16227232.
- [9] 李建林, 李雅欣, 陈光, 等. 退役动力电池健康状态特征提取及评估方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1332-1346.
LI Jianlin, LI Yaxin, CHEN Guang, et al. Research on feature extraction and SOH evaluation methods for retired power battery[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1332-1346.
- [10] 周宏喜, 卢世杰, 魏红港, 等. 废旧动力电池破碎料涡流分选试验研究[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(5): 66-72.
ZHOU Hongxi, LU Shijie, WEI Honggang, et al. Experimental study on eddy current separation of spent traction Battery broken materials[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(5): 66-72.
- [11] 刘超, 刘勇, 陈志强, 等. 某废旧锂离子动力电池混合电极粉末分选试验研究[J]. *有色金属工程*, 2023, 13(11): 64-69.
LIU Chao, LIU Yong, CHEN Zhiqiang, et al. Pyrolysis-beneficiation process experiment on a mixed electrode powder for a spent lithium-ion batteries[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2023, 13(11): 64-69.
- [12] 财经在线: 创新引领, 实现动力电池全生命周期绿色循环利用[EB/OL]. [2024-12-23]. <https://cjzx.cheyoutai.com/post/5869.html>.
- CAIJINGZAXIAN: Innovation Leads the Way to Achieve Green Circular Utilization Throughout the Entire Lifecycle of Power Batteries[EB/OL]. [2024-12-23]. <https://cjzx.cheyoutai.com/post/5869.html>.
- [13] 中国机器视觉网: 3D视觉引导高精度动力电池拆解[EB/OL]. [2025-02-10]. <https://www.china-vision.org/cases-detail/228375.html>.
China Machine Vision Network: 3D vision-guided high-precision power battery disassembly[EB/OL]. [2025-02-10]. <https://www.china-vision.org/cases-detail/228375.html>.
- [14] 亿欧: 一文看懂特斯拉人形机器人Optimus10次进展更新和迭代史[EB/OL]. [2024-12-30]. <https://www.iyiou.com/analysis/202412031084289>.
Iyiou: a comprehensive guide to Tesla's humanoid robot optimus: 10 times development milestones and evolution history[EB/OL]. [2024-12-30]. <https://www.iyiou.com/analysis/202412031084289>.
- [15] ZHAO Y Y, ZHANG W, HU E H, et al. BatSort : enhanced battery classification with transfer learning for battery sorting and recycling[J]. *Computer Science*, arXiv: 2404.05802. DOI : 10.48550/arXiv.2404.05802.
- [16] 甘涛, 宋卫锋, 刘勇, 等. 废旧电池电极材料的磁性分离机制及其提纯工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(12): 3664-3674.
GAN Tao, SONG Weifeng, LIU Yong, et al. Magnetic separation mechanism and purification process of spent battery electrode materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(12): 3664-3674.