

《新能源与储能·交能融合》专栏

【编者按】交通与能源融合发展是交通与能源领域中的一次重大革命,是建设交通强国、实现“双碳”目标、保障能源安全的必然要求。《国家综合立体交通网规划纲要》提出,推进交通基础设施网与能源网融合发展,将交通基础设施与能源设施统筹布局规划建设,强化共建共管、共享共营,提高设施与资源综合利用效率,减少能源资源消耗,促进交通基础设施网、智能电网与其他网络的融合。

交能融合不仅是交通与能源的简单组合,更是交通基础设施、交通工具、交通供能与能源行业的深度融合。在交通强国、碳中和及总体国家安全观指引下,交能融合正在加速交通基础设施网、运输服务网、能源网与信息网络的融合发展。科技创新是交能融合的重要引擎。密切关注和推进交能融合科技的新发展是推动交通与能源深度融合的必由之路。为此,本刊特开设《新能源与储能·交能融合》专栏,旨在深入促进交能融合的新发展。

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240808002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0001-27

引用格式: 闫苏,王军强,徐亚东,等. 交通与能源融合发展的现状与展望[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 1-27.

Citation: YAN Su, WANG Junqiang, XU Yadong, et al. Current status and prospects of integrated development of transportation and energy[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 1-27.

交通与能源融合发展的现状与展望

闫苏¹, 王军强¹, 徐亚东¹, 闫丽¹, 季永华¹, 贾传坤^{1,2}

(1. 张家港德泰储能装备有限公司, 江苏 苏州 215627; 2. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 交通和能源是全球基础性、战略性产业, 决定了人类社会的发展和更迭。随着我国“双碳”目标的推进, 交通、能源等各个行业的低碳化、绿色化转型进程正稳步进行。交通和能源的融合发展, 为交通行业的新型能源综合利用、能源行业技术更新提供了前所未有的机遇。目前, 利用交通资产能源化、交通用能绿色化途径来有效减少交通领域碳排放已逐渐成为共识。本文综述了当前交通与能源融合发展的现状, 介绍了交通领域清洁能源的开发、以储能构建交通行业源网荷储、新能源电动汽车开发和交通出行配套设施建设情况, 以及交通设备电气化、能源化进展。同时, 结合涉及交通系统能源化开发的电池技术, 介绍了当前热门的动力锂离子电池技术和液流电池储能技术, 重点介绍了废旧沥青等交通固废材料作为电池改性材料被回收再利用的相关技术。本文总结了技术创新在交通能源融合发展中的重要性, 提出要加快科技研发, 推动产业链发展, 全力突破核心技术关键瓶颈, 助力交通能源融合发展。

关键词: 新能源; “双碳”目标; 交能融合; 交通资产能源化; 交通用能绿色化; 动力电池; 储能电池

中图分类号: TK01

文献标志码: A

Current status and prospects of integrated development of transportation and energy

YAN Su¹, WANG Junqiang¹, XU Yadong¹, YAN Li¹, JI Yonghua¹, JIA Chuankun^{1,2}

(1. Zhangjiagang Detai Energy Storage Equipment Co., Ltd., Suzhou 215627, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The transportation and energy sectors are fundamental and strategic industries in the

收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-08-26; 接受日期: 2024-08-26

基金项目: 湖南省重点研发计划(2023SK2053); 湖南省团队百人计划(湘组2016-91)

通信作者: 贾传坤(1983—)(ORCID: 0000-0001-7171-1414), 男, 教授, 主要从事中大规模储能液流电池、道路交通领域功能材料、固废资源化利用和锂离子电池正极材料回收研究方面的研究。E-mail: jiachuankun@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

world, determining the development and transformation of human society. As China's goals of "Dual Carbon" progresses, transportation, energy, and other sectors are steadily transitioning to low-carbon and environmentally friendly industries. The integrated development of transportation and energy sectors has presented unprecedented opportunities for the transportation industry to comprehensively utilize new types of energy and for the energy sector to update its technology. At present, the use of energy-efficient and environmentally friendly transportation assets has gradually become a consensus to effectively reduce carbon emissions in the field of transportation. The current status of the integrated development of transportation and energy was summarized. The development of clean energy in the field of transportation, the construction of "source, network, load, and storage" in the transportation industry with energy storage, the development of new energy electric vehicles, the construction of transportation supporting facilities, as well as the progress of transportation equipment electrification and energy were introduced. Additionally, combined with the battery technology involved in the development of transportation system energy, the current hot power lithium battery technology and flow battery energy storage technology were introduced, mainly focusing on the technologies related to recycling of waste asphalt and other traffic solid waste materials as battery modification materials. The importance of technological innovation in the integrated development of transportation and energy was summarized, and the concepts of accelerating scientific and technological research and development, promoting the development of the industrial chain, making every effort to breakthrough the key bottlenecks of core technologies, and helping the integrated development of transportation and energy were put forward.

Key words: new energy; goals of "Dual Carbon"; integrated development of transportation and energy; energy-focused utilization of transportation assets; greening of transportation energy; power battery; energy storage battery

Foundation items: Project (2023SK2053) supported by the Key Research and Development Program of Hunan; Project (Xiang Zu 2016-91) supported by 100 Talented Team of Hunan Province

Corresponding author: JIA Chuankun (1983—) (ORCID:0000-0001-7171-1414), male, professor, research interest: large-scale energy storage flow batteries, functional materials and solid waste resource utilization in the road transportation field, and recycling of positive electrode materials for lithium batteries.

E-mail: jiachuankun@csust.edu.cn

0 引言

交通是我国国民经济中基础性、先导性、战略性新兴产业,是碳排放的重要领域之一。研究表明,我国交通领域的二氧化碳排放量约占全国二氧化碳排放总量的10%^[1-5]。实现碳达峰、碳中和是我国向世界作出的庄严承诺,因此在交通领域实施节能减排、打造绿色交通迫在眉睫^[6]。

我国各类清洁能源丰富。国家能源局统计信息表明,自“十四五”规划以来,我国风电和光伏发电

电装机规模年均增长超过100 GW,实现跃升式增长;截至2023年底,我国风电和光伏发电装机规模分别达440和610 GW,二者之和占全国电源装机总量的36%^[7]。在我国能源消费结构中,交通行业用能约占比17%;在交通行业用能结构中,绿色电力占比不足10%。因此,推动公路、港口、铁路等典型应用场景的绿色电能替代可以有效发挥新能源的就地可靠替代作用^[8]。据估计,我国交通运输用地占国土面积的1%,若在20%的这些用地面积上布设光伏,预计装机规模约为950 GW^[9-10]。可见,在交通领域发展绿色能源潜力巨大,不仅有

利于进一步发展可再生能源,而且有利于推动交通能源低碳化转型^[11]。

2019年,我国发布《交通强国建设纲要》,明确指出,要进一步提高交通领域的智能化、绿色化和共享化程度;构筑多层次、一体化的能源交通融合综合交通枢纽体系^[12];优化交通能源结构,推进新能源、清洁能源应用;促进公路货运节能减排,推动城市公共交通工具和城市物流配送车辆全部实现电动化、新能源化和清洁化^[13-14]。

在“双碳”和建设交通强国目标的引领下,交通领域积极发展清洁能源和新能源利用工具,推动交通行业绿色低碳化转型^[15-16]。在节能减排和交通强国政策的推动下,交通与新能源一体化发展成为不可逆转的时代潮流,是关系到国家未来发展的战略布局。因此,构建绿色、弹性、自洽和可持续发展的交通能源一体化系统是建设新时代美丽中国和实现交通强国的必由之路^[17-19]。

交通与能源融合发展是建设绿色交通强国、落实国家能源安全新战略、践行碳达峰和碳中和行动的有效结合点和重要应用场景,有利于加快交通运输用能的清洁替代与低碳化转型,促进新能源的高效利用^[20-21]。在交通能源融合发展过程中,要充分挖掘交通基础设施中的新能源资源,积极配套建设风电、光伏、储能,实现交通电气化、电动化发展,解决在新能源汽车发展中存在的充换电基础设施配套问题,有力促进交通行业新能源高效利用^[22-24]。

本文综述了当前交通领域与能源领域的融合发展现状,以加快清洁能源利用并助力绿色交通建设。本文首先介绍了道路、水运、轨道和航空等不同交通场景对风能、光伏等清洁能源的利用与融合,以及清洁能源的稳定利用与储能技术的关系;接着,介绍了交通场景中储能技术的建设,并对道路交通中新能源汽车配套建设情况和交通设备的电气化进行了总结;然后,鉴于交通与能源的融合发展离不开各种新技术的引领,综述了当前与交通行业密切相关的新能源技术,系统概述了锂离子动力电池技术和液流储能电池技术的发展及建设情况;此外,根据交通能源融合发展的现状,介绍了各种交通固废材料融入新能源电池技术的研究情况和光储充技术的发展;最后,总结了

交通能源融合发展中技术创新的重要性,倡导加快科技研发,推动产业链发展,全力突破核心技术关键瓶颈,助力交通能源融合发展。

1 交通与能源融合发展

1.1 交通网络中的清洁能源利用

1.1.1 清洁能源资源丰富

我国太阳能资源丰富。根据各地区经纬度及气候差异,我国太阳能资源可分为四类地区^[25-26],如表1所示。在表1中,I类区域即太阳能资源极丰富地区,其每平方米的年辐射量超过 1.86×10^3 kWh;II类区域即太阳能资源丰富区域,其每平方米的年辐射量为 $1.50 \times 10^3 \sim 1.86 \times 10^3$ kWh;III类区域即太阳能较丰富地区,其每平方米的年辐射量为 $1.20 \times 10^3 \sim 1.50 \times 10^3$ kWh;IV类区域即太阳能贫瘠区域,其每平方米的年辐射量少于 1.20×10^3 kWh^[27-28]。我国89%的轨道交通里程分布在II、III类光资源区,其光伏发电潜力巨大^[29]。

我国海岸线长,季风气候特征显著,风能资源丰富。若陆上年风电上网可用小时数按等效满负荷2 000 h计算,我国每年可提供的电量约为 5.00×10^{11} kWh^[30-31]。我国“三北地区”具有发展风能的显著优势,已形成大规模、高集中、远距离、高电压的风电开发模式^[32-33],但其电网条件仍较弱。

目前,我国风能利用和发展的重点地区为甘

表1 我国太阳能资源分布的区域划分^[29]

Table 1 Regional division of distribution of solar energy resources in China^[29]

资源区类别	地区
I类	宁夏、青海(海西)、甘肃(嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌)、新疆(哈密、塔城、阿勒泰、克拉玛依)、内蒙古(除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔外的地区)
II类	北京、天津、黑龙江、吉林、辽宁、四川、云南、内蒙古(赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔)、河北(承德、张家口、唐山、秦皇岛)、山西(大同、朔州、忻州、阳泉)、陕西(榆林、延安)、青海(除I类外的其他地区)、甘肃(除I类外的其他地区)、新疆(除I类外的其他地区)
III类	河北(除II类外的其他地区)、山西(除II类外的其他地区)、陕西(除II类外的其他地区)、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、贵州、西藏
IV类	除I、II、III类资源区外的其他地区

肃、江苏、河北、内蒙古、新疆、吉林、山东等地区。此外,我国沿海地区及岛屿地区风力资源丰富,海上风速强,且向内陆延展约10 km宽的风能资源丰富区已形成,其年可用小时数为7 000~8 000 h^[34-35]。我国风资源分布的整体情况如表2所示。

表2 我国风能资源分布的区域划分^[29]

Table 2 Regional division of distribution of wind energy resources in China^[29]

资源区类别	地区
I类	内蒙古(除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔外的其他地区)、新疆(乌鲁木齐、伊犁哈萨克族自治州、克拉玛依、石河子)
II类	河北(张家口、承德)、内蒙古(赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔)、甘肃(嘉峪关、酒泉)、云南
III类	吉林(白城、松原)、黑龙江(鸡西、双鸭山、七台河、绥化、伊春、大兴安岭地区)、甘肃(除嘉峪关、酒泉外的其他地区)、新疆(除乌鲁木齐、伊犁哈萨克族自治州、克拉玛依、石河子外的其他地区)、宁夏
IV类	除I、II、III类资源区外的其他地区

1.1.2 道路交通领域清洁能源利用

我国有全球最大里程的道路交通网络,且交通沿线有丰富的清洁能源。因此,对已建的道路进行全路域分布式新能源开发利用是践行绿色交通的关键。2010年,瑞典建筑师HANK^[36]提出将高速公路建设成为现代建筑,且用光伏电池板覆盖高速公路,为道路照明、标牌和汽车等提供电力。有科研人员提出^[37-40]可以充分利用高速公路沿线(如边坡、互通、中央分隔带等)、沿线设施场区(如服务区、停车区、收费站、管养中心等)的不同场景,科学开发屋顶光伏、边坡光伏、垂直轴风力发电等分布式清洁能源,配合使用新型储能技术,构建“清洁能源+公路”系统,并与大电网实现相互支撑,满足高速公路多种类、多等级负荷的多样化用电需求。2019年,上海龙阳路基地的光伏项目并网发电,其总装机容量为 1.66×10^4 kWh,年均发电量约 5.00×10^7 kWh,如图1(a)所示。2021年,山东高速集团在荣乌高速威海段建设了全国首个高速公路边坡光伏发电试验项目并成功并网,如图1(b)所示。

除此之外,在我国现有的风能发电项目中,海太长江隧道清洁能源供电工程是典型代表。该项目利用隧道周边及屋顶的分布式风电机组和光伏

电站,结合地下储能系统,为隧道提供绿色、低成本的施工和运营用电。该项目预计年发电量约 2.40×10^7 kWh,使海太长江隧道在工程建设和运营期间均实现绿色化用电。这种创新交通能源融合发展模式旨在打造全国首座高速公路“零碳隧道”,推动我国交通行业的绿色转型。该项目成功地将风能应用于隧道供电,展现了可再生能源在交通领域应用的广阔前景,同时在隧道设施中践行了隧道风力发电这种全新发电理念。由钟衍提出的隧道风力发电是一种创新能源利用方式,通过在地铁隧道内安装风力发电装置,利用列车行驶时产生的风能进行发电,以满足地铁站的照明及广告牌等用电需求。类似项目已在北京立项,具有缓解城市电力紧张、降低碳排放等显著优势。

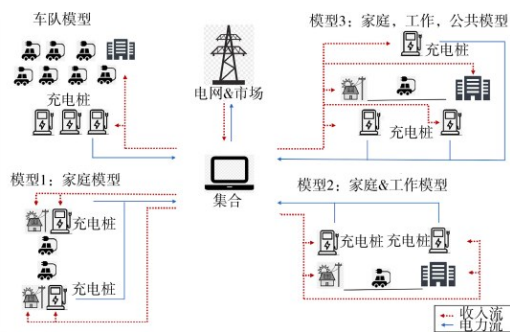
在道路交通领域,可采用固定线路的新能源绿色替代智慧交通的应用模式,依托运煤运矿、物流专线、公交专线等特殊场景的电热冷氢用能需求,利用风能和光能等清洁能源,应用充换电、加氢、车辆到电网的双向充放电(vehicle to grid, V2G)、自动驾驶、智慧调度运行等技术,同步建设充电桩、换电站、加氢站等。图1(c)~1(d)分别是V2G工作原理、V2G光伏自循环直流充电桩建设图^[41]。业界通过上述方式可实现多类能源与新型电力网、立体化交通网、电力市场交易网的深度融合,打造绿色低碳电气化运输专线^[42-45]。



(a) 龙阳路基地光伏项目



(b) 高速公路边坡光伏项目

(c) V2G 的工作原理^[41]

(d) V2G 光伏自循环直流充电桩

图1 道路交通领域光伏资源应用场景^[41]Fig. 1 Application scenarios of photovoltaic resources in field of road traffic^[41]

1.1.3 水运航道清洁能源利用

港口主要用能设备为大型设备,占地面积大,具有较为丰富的屋顶优势。大型港口可以采取绿色智慧供能应用模式,实现能源“自发自用、余电上网”,同时充分利用港口的风能、太阳能、海洋能等可再生能源,构建分布式可再生能源系统,为港口用车、照明、船舶岸电及办公区域提供绿电。2019年,山东青岛港全球首创的氢动力自动化轨道吊采用了中国自主研发氢燃料电池组,不仅减轻了设备自重、提高了发电效率,而且实现了零排放。

另外,内陆航道全流域也可以采用低碳智慧供能应用模式。针对航道两侧堤岸可以采用土地光伏、航线周边可以布置土场新能源等绿色电源,以及运输船舶、水上服务区、助航服务设施、沿河居民用电等存在多种航道用能需求,有必要因地制宜配套建设储能设施与智慧调度运行系统,并通过与大电网友好交互,逐步实现源网荷储协同优化。

1.1.4 轨道交通清洁能源利用

轨道交通场站可以采取绿色运输应用模式,

依托铁路、轻轨、地铁等轨道沿线,利用枢纽场站屋顶、隔音墙等,科学布局分布式能源设施^[46-48]。2020年,京雄城际铁路雄安站的站房屋顶分布式光伏发电项目在正式并网发电后,可有效节约30%的电能^[49],同时车站之间的15 m宽的“光廊”既改善了地面候车厅的采光通风环境,又节约了车站照明用电。该光伏电站总面积为 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,铺设了 1.77×10^4 块多晶硅光伏组件,采用自发自用、余电上网模式,总装机容量为6 000 kW。自2020年12月正式并网发电以来,该电站已累计发电超过 $1.00 \times 10^7 \text{ kWh}$ 。

同时,轨道交通领域可以应用电化学储能、飞轮储能等新型储能技术^[50-51],配套建设绿电制氢设施,可以为沿线电气化列车及设备、氢燃料机车等提供清洁能源,实现绿色用能 and 高效节能^[52-54]。

1.1.5 航空领域清洁能源利用

航空研究的战略推动力包括全球机动、环境挑战、技术聚焦这三个方面。目前,业界通过电能、氢能和可持续航空燃料等新能源航空技术实现向低碳航空动力的过渡,以应对来自环境的挑战。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)认为,电推进飞机可实现节能超过60%、减排超过90%、降噪超过65%的潜在收益;欧盟认为氢动力飞机是达到欧洲2050年碳排放目标的唯一途径。

近年来,全球兴起新能源飞行器技术发展热潮。据不完全统计,截至2022年9月,全球约有300个在研新能源飞行器项目,主要集中在美国、欧洲和中国,其代表项目如表3所示。目前,多种电动垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)和通勤飞机已完成首飞并取得适航认证,电动/混动涡桨干线飞机进入原型机制造或地面测试阶段,更大的新能源干/支线飞机开始进行方案、技术论证。此外,空客ZEROe、英国政府FlyZero、欧盟“氢能航空2050”等计划均提出要在2035年前将氢动力支线飞机投入市场,以及在2050年前实现氢动力干线飞机的大规模应用。

新能源飞行器除按照能源供给和动力产生方式进行分类外,还可以按照用途、航程和载客(货)量分为城市空运飞机(eVTOL、通勤飞机为主)、支线飞机、中型干线飞机、大型干线飞机和超大型干

线飞机。

城市交通网与电力网逐步实现时空深度融合,并开始进行智慧运营应用,具体体现为:以充电桩网络、换电站集群等构建虚拟电厂,参与电网运行和电力市场,提供调峰调频等辅助服务并获得收益,在时间上实现交通负荷转移;同时结合无人驾驶、智慧通信、物联网等技术,以价格驱动方式实现交通能源基础设施的优化利用,如利用城市区域间充电价格差异来调节充电车辆数量,进而调整不同区域充电桩的用电负荷,以在空间上调整交通负荷^[55-57]。

表3 全球新能源飞行器代表项目

Table 3 Global representative projects of new energy aircraft

项目/型号	企业/机构	技术方案	特点	所处阶段
亿航/EH216	中国/亿航	电推动	两座,电动垂直起降飞行器	适航认证
锐翔/RX4E	中国/锐翔	电推动	4座,固定翼轻型飞机	适航认证
ACCEL	英国/罗罗	电推动	单座,高速验证机	完成首飞
X-57	美国/航空航天局	电推动	4座,固定翼轻型飞机	地面测试
Volo Connect	德国/Volocopter GmbH	电推动	4座,固定翼轻型飞机	完成首飞
ZEROe	法国/空客	氢动力	三种型号同步推进	概念设计
飞马	美国/航空航天局	氢动力	48座,氢混动、“3+2”动力	概念设计
ATR 72 混改	法国/ATR	氢动力	80座,氢混动、“1+1”动力	概念设计

1.2 交通网络的储能技术应用

交通领域中的风、光等新能源的应用日益增长,但这些新型能源受时空的限制,存在天然的间歇性和波动性,单独使用并网会对电网造成冲击,不利于交通供能的稳定。此时,储能技术有助于平衡电力供需,保障交通网络的稳定运行。通过储存电力,储能技术可在高峰时段为交通设施提供稳定的电力支持,避免电网过载和供电中断;储能技术将低谷时段的电力储存起来,在高峰时段释放,提高了电能的利用效率。新能源汽车是交通领域减排的重要载体,而储能技术能够为新能源汽车提供清洁能源,减少对化石燃料的依赖。

交通领域储能发展是一个综合性的战略过

程,旨在推动交通行业的绿色、低碳、可持续发展^[58]。在交通领域,储能技术的应用不仅是一项技术革新,更是推动可持续发展和绿色出行的重要力量^[59]。随着新能源汽车的普及和交通网络的不断完善,如何高效、稳定地供电成为交通领域面临的一大挑战^[60]。此时,储能技术提供了有效解决手段^[61]。储能技术通过将可再生能源转化为电能并储存起来,可以确保新能源汽车在行驶过程中的清洁能源供应,从而大幅度降低碳排放,促进环境保护和可持续发展^[62-65],同时也有利于保障电力供应的稳定性、提高能源利用效率及推动绿色低碳发展。

1.2.1 储能能在公路交通中的应用

高速公路通过储能技术实现了能源的智能化管理与利用^[66]。业界在隧道入口、出口等关键位置利用光伏发电板收集太阳能,并将其转化为电能储存起来。这不仅为隧道内的照明设备提供了稳定、可持续的电力供应,还减少了对传统电能的依赖,有助于节能减排。储能技术还可应用于高速公路的监控系统和充电桩。在监控系统中,储能技术确保在断电等突发情况下,监控设备仍能正常运行,有利于提高道路安全保障能力;在充电桩中,储能技术为电动汽车提供稳定的充电服务,有效解决传统充电桩的供电不稳定问题。

攀枝花至大理高速公路实施了分布式光储项目,利用高速公路红线范围内的道路边坡、隧道隔离带等全场景建设分布式光储。该项目集成了光伏发电、电能储存等功能,为高速公路低碳运行提供了清洁能源用能保障。据预计,该项目年均发电量达 2.85×10^6 kWh,有助于节约大量标准煤并减少二氧化碳、二氧化硫等的排放。

目前,作为现代公路交通网络的重要组成部分,高速公路服务区已不限于为用户提供休息和补给服务,更重要的是为车辆提供能源补给,并且其补给能源形态已从传统单一的汽、柴油逐渐转变为加油、充电、加氢、加气的综合能源,已在利用储能技术方面展现出了高效、环保与可持续性的优势^[67-68]。一方面,服务区光伏建设配备储能系统将白天光伏发电产生的多余电能储存起来,以备晚上或用电高峰时段使用。这种“光储充”一体化不仅解决了服务区内的用电问题,还能够用电

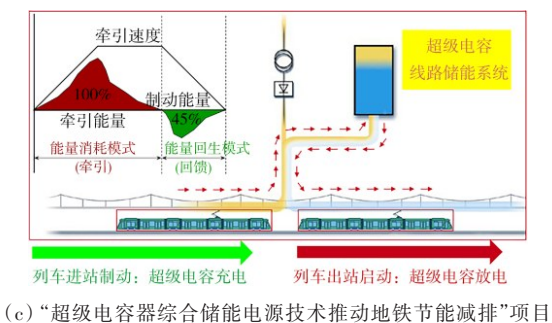
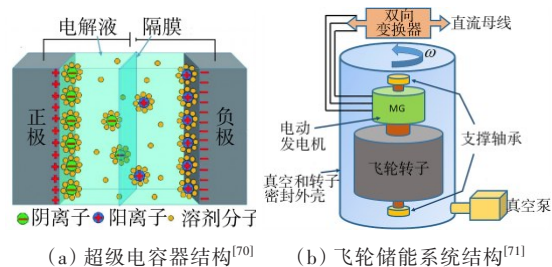
力紧张时释放储存的电能,减轻电网的供电压力。另一方面,服务区内的充电桩利用储能系统为电动车提供绿色、快速充电服务。例如,某些服务区设置了总功率高达480 kW的超级快充电站,能够快速为电动车补充能源,满足车主的出行需求,并且服务区还可以通过集成控制系统对光伏发电、储能和充电设施进行统一管理和控制,以确保整个系统的高效运行。这种智能化的管理模式不仅提高了能源利用效率,还增强了服务区的自主性和安全性。服务区通过综合利用储能技术,实现了能源的清洁利用和高效管理,为车主提供了更加便捷、环保的服务。例如,惠州惠大高速元山服务区建设的“光储充”一体化低碳示范项目集成了光伏发电、储能电池、智能充电桩等多项技术,年发电量约 1.00×10^6 kWh,可覆盖整个服务区的清洁能源系统。

1.2.2 储能在轨道交通中的应用

储能技术在轨道交通中展现出显著的优势和潜力^[69],通过储存电能,确保在高峰时段或突发情况下,轨道交通系统能够持续、稳定供电,因此被广泛应用于轨道交通的供电系统。这不仅能够提高轨道交通的运行效率,还能增强系统的稳定性和可靠性,以及有助于优化轨道交通的能源结构。通过安装光伏发电系统,轨道交通站点能够收集太阳能并将其转化为电能,再通过储能系统储存起来,以用于满足站点内部的用电需求。这不仅减少了对传统能源的依赖,还降低了碳排放,有助于推动轨道交通的绿色、低碳发展。储能技术还能够解决轨道交通中的能源波动问题。这是因为轨道交通的用电负荷较大、波动性较强,传统的电力系统难以满足用电需求,而储能技术可以通过储存电能,在用电高峰时段释放能量,以平衡电网的供需关系,并保障轨道交通的正常运行。

超级电容器、飞轮储能系统的结构如图2(a)~2(b)所示^[70-71]。宁波中车新能源科技有限公司的“超级电容器综合储能电源技术推动地铁节能减排”项目如图2(c)所示。该项目采用超级电容器作为储能器件,具有高可靠、高安全和长寿命等优点,有利于回收再利用车辆再生制动能量,同时实现了节能减排。据广州地铁反馈,场站综合储能电源平均节约电能为 1.40×10^3 kWh/(d·站),每年

减少排放490 t二氧化碳,节约 5.1×10^5 RMB电费。2019年7月,盾石磁能科技有限责任公司开发了1 MW、GTR型号的飞轮储能系统,如图2(d)所示。该飞轮储能系统已成功应用于北京地铁房山线广阳城站,首次实现了飞轮储能技术在城市轨道交通列车再生制动能量回收中的应用。



(d) 1 MW、GTR型号的飞轮储能系统

图2 储能技术结构及其在交通领域应用场景^[70-71]

Fig. 2 Energy storage technology structure and its application scenarios in field of transportation^[70-71]

1.2.3 储能在港口、机场中的应用

作为现代物流枢纽的重要交通节点,港口和机场对于能源的需求日益增加。为了应对能源价格波动、能源使用效率亟待提高及绿色可持续发展亟待实现,储能技术的应用显得尤为重要^[72]。

港口通过部署大规模的储能系统,能够有效平衡电力供需。在用电高峰时段,储能系统可以释放储存的电能以补充电网供应;在低谷时段,储能系统可以利用富余电力充电。这样既降低了运

营成本,又避免了能源浪费。此外,储能技术还有助于港口实现清洁能源的广泛应用,如太阳能、风能等可再生能源通过并网接入,可进一步提高港口的绿色能源使用比例。船舶在停靠港口作业期间,可以停止使用船舶上的自备辅助发电机,转而使用陆地电源等岸电储能系统向主要船载系统供电,也可有效改善船舶带来的空气污染,如图3(a)所示。据统计,船舶靠港停泊期间所产生的碳排放量占港口总量的40%~70%。

机场作为高能耗的交通设施,同样需要借助储能技术来优化能源结构。机场内的照明、导航、空调等系统需要稳定、可靠的电力供给,而储能系统可以在电网出现故障时提供应急电源,确保机场运营的安全和顺畅。同时,储能技术还能用于平滑机场的电力负荷曲线,减小峰谷电价差带来的成本压力。西安咸阳国际机场已投入使用储能式电源车,将后者用作飞机的“充电宝”,替代飞机辅助动力装置(auxiliary power unit, APU)及部分桥载电源,如图3(b)所示。



(a) 单向岸电桩 (b) 咸阳机场储能式电源车
图3 储能在港口、机场中的应用场景

Fig. 3 Application of energy storage in ports and airports

1.3 新能源汽车发展

蓬勃发展的新能源技术及其应用在交通领域实现了绿色能源供给,能够利用广阔的交通分布,大力开发新型能源,并依托储能技术实现能源的存储,解决新能源的波动性,还能新能源在交通领域实现持续供能和达到风能、光能的“储、充”一体化绿色发展奠定能源基础。

新能源催生新技术。在新能源的创新发展和绿色出行需求的共同作用下,以新能源替换传统化石能源已成为交通领域的发展趋势,且新能源技术的突破为新能源汽车的蓬勃发展提供了强有力的支撑与保障。实现交通领域出行工具的能源清洁化是构建绿色交通的必由之路,也是新能源广泛利用的结果。新能源汽车主要依托电能作为驱动力,随着交通技术的发展,新能源发电、储能、

汽车充电一体化的未来格局正在逐步形成。

1.3.1 新能源汽车现状

2024年,国务院印发《2024—2025年节能降碳行动方案》,明确提出交通运输行业要推进交通运输装备低碳化转型^[73]。预计,新能源汽车产业的发展不仅能切实减少碳排放量、降低交通污染程度,也能间接推动产业经济的绿色转型^[74-75]。

新能源汽车的电动化发展过程是以化石能源为燃料的传统内燃机汽车,经历混合动力汽车、插电式混合动力汽车、增程式电动汽车、燃料电池汽车的演化,直到形成纯电动汽车,其间汽车电动化的占比不断提高^[76-77]。新能源汽车按能源供给方式主要分为纯电动汽车、混合动力汽车(包括插电式、增程式混合动力汽车)、燃料电池汽车和其他新能源汽车^[78-79]。截至2023年底,我国新能源汽车保有量超过 2×10^7 辆,其中纯电动汽车保有量为 1.552×10^7 辆,其占比超过76%。预计2024年底,中国新能源汽车保有量预计接近 3×10^7 辆,其中纯电动汽车占比约80%,减排量预计超过 1×10^8 t^[80]。

1.3.2 充换电设施服务发展

随着交通电气化程度不断提高,充换电设施已成为电动汽车商业化、产业化过程中的重要组成部分。新能源汽车按电能补给模式分为充电与换电两种,如图4所示,其中,充电模式指使用外部交、直流电源直接对动力电池充电;换电模式指通过直接更换车载电池为汽车补充电能。

我国新能源汽车已进入规模化快速发展新阶段。截至2024年5月底,全国充电基础设施总量达 3.17×10^6 台,同比上一周期增长52%,如图5(a)所示。我国已建成世界上数量最多、服务范围最广、品种类型最全的充电基础设施体系^[75, 81-84]。作为新能源汽车的配套基础设施,新能源汽车充电桩是新基建的核心产业之一,对推动整体新能源产业的发展具有不可忽视的作用^[85]。大功率快速

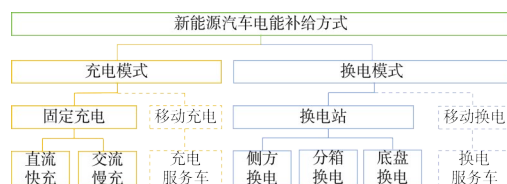


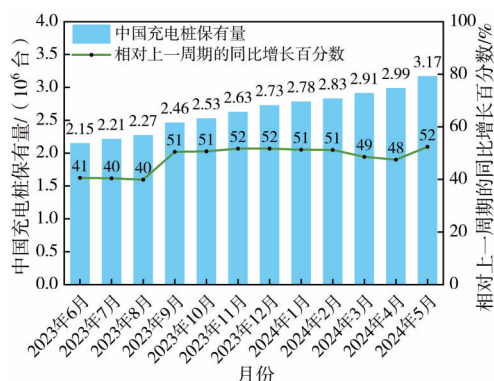
图4 新能源汽车电能补给方式分类

Fig. 4 Classification of energy supply methods for new energy vehicles

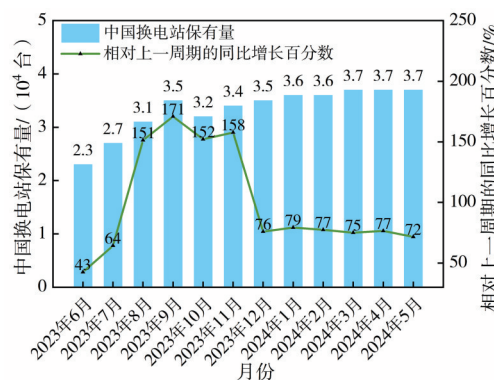
充电、短时间内获得大量续航里程是高速公路上新能源汽车用户的刚性需求。高速公路服务区的充电桩建设有利于吸引新能源汽车在高速公路上行驶,同时消除了新能源车主在高速公路上的后顾之忧,对促进新能源汽车推广起积极作用^[86-87]。目前,新能源汽车充电桩设施的发展存在地域分布不均、车桩比失衡、充电难、效率低等问题。2024年1月,国家能源局发布《关于组织开展“充电基础设施建设应用示范县和示范乡镇”申报工作的通知》,提出到2025年“推动实现充电站‘县县全覆盖’、充电桩‘乡乡全覆盖’的基本要求”。

为了满足新能源汽车快速增长带来的充电需求,我国正在加快换电模式的推广应用。从2023年6月到2024年5月,中国换电站保有量及其相对上一周期的同比增长百分数如图5(b)所示。

换电模式具备电能补给效率高、购车成本低、



(a) 2023年6月—2024年5月中国充电桩保有量及其相对上一周期的同比增长百分数



(b) 2023年6月—2024年5月中国换电站保有量及其相对上一周期的同比增长百分数

图5 2023年6月—2024年5月中国充电桩、换电站的保有量及其相对上一周期的同比增长百分数

Fig. 5 Quantity and year-on-year growth of charging piles and battery-changing stations in China from June 2023 to May 2024

电池可迭代升级等优点,其中换电站还能作为储能系统,通过削峰填谷缓解电网压力,有助于回收电池。2020年5月的《政府工作报告》提出“两新一重”建设,将换电站明确纳入新基建建设范畴。2021年10月,《关于启动新能源汽车换电模式应用试点工作的通知》决定启动新能源汽车换电模式应用的试点工作,其中的8个综合应用类城市分别为北京、南京、武汉、三亚、重庆、长春、合肥、济南。2022年12月,《扩大内需战略规划纲要(2022—2035年)》把换电站列入国家战略发展规划。2022年1月,国家发展改革委、市场监管总局等多部门联合发布《关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》,提出加快换电模式推广应用^[88]。2023年7月,《关于促进汽车消费的若干措施》提出加快换电模式推广应用和建设。换电模式克服了传统交流充电桩和充电站的缺陷^[89],但仍需要加速推进换电标准的制定与统一,使换电电池包真正能够在不同车企、不同换电站、不同用户之间互通互换^[90]。

1.3.3 光储充/换一体电站实现能源补给

光储充/换一体电站作为一种新型的充换电设施,集成了光伏发电、储能和充换电技术,是新能源、储能、智能充电协调支撑的清洁、绿色、可持续充电模式,由光伏发电、储能电池和充电桩三个核心部分组成,其根本目的是为新能源汽车补充新能源电力。

光储充/换一体综合能源管理的充电站使用清洁能源实现供电。光伏、储能和充/换电设施通过电气联接并形成了一个微电网,通过新能源(光伏、风电)发电并进行电能存储,在新能源车辆充电时释放绿色电能。光伏+储能系统的应用缓解了充电桩大电流充电时对电网的冲击,因此光储充/换一体电站不仅能为电动汽车提供清洁电能,还能实现电力供应削峰填谷等辅助服务功能,保障电网平稳运行,可有效提高电网的运行效率。

随着交通能源融合发展,为充分利用道路交通资源,建设光储充/换一体电站明显有助于建设公路能源智能体。更多的清洁能源将在公路服务区、交通枢纽、充电站被利用,光储充/换电站也将与车、网协同互动,加速推进交通低碳化转型发展,成为支撑新型电力系统的关键一环。

近年来,光储充/换一体电站不断被推广应用。2024年3月,蔚来公司的首座高速光储充/换一体换电站正式投入运营,采用了该公司自研的双向交换电大功率液冷电源模块,其峰值效率达98%,充放电功率为63 kW。该换电站不仅可以给车辆提供换电服务,还能响应电网调度指令,对电网进行反向放电,从而进一步提升电网的稳定性,克服本地清洁能源随机性、波动性的弱点,促进清洁能源的有序消纳。2024年4月,天津市首座光储充一体化新能源重卡公共换电站建设项目启动,该换电站预计能提供3~5 min快速换电服务,极大缩短电能补给时间、提高物流效率,为物流运输的低碳化进程提供了关键支持。

新能源汽车充电基础设施作为交通能源融合的关键设施,对推动新能源汽车的消费和产业发展至关重要。光储充/换一体电站实现了清洁能源的利用和存储,减少了传统能源的消耗,促进了新能源的消纳,有助于交通领域的绿色低碳化转型,同时也为新能源汽车提供了稳定的电力供应,保障了车辆的持续运行,为交通能源融合提供了新的发展路径,为未来的可持续发展奠定了坚实基础。

1.4 交通设备电气化发展

1.4.1 新能源为交通设备电气化提供动力源泉

新能源,特别是可再生能源,如太阳能、风能等,为交通设备电气化提供了源源不断的动力。这些新能源具有清洁、可再生的特点,不仅能够降低对化石能源的依赖,还能减少环境污染和温室气体排放^[91]。电动汽车的兴起得益于不断进步的新能源电池技术,后者使电动汽车的续航里程和充电速度显著提升;太阳能充电桩的普及也为电动汽车提供了更环保、经济的充电方式。随着电动汽车等交通工具的普及,对新能源的需求不断增加,同时新能源产业大力发展,并带动了相关产业链的升级和转型。

1.4.2 交通设备电气化促进新能源的广泛应用

交通设备电气化的发展促进了新能源的广泛应用。随着电动汽车、电动公交车等交通工具的普及,对新能源的需求不断增加。这促进了新能源产业的快速发展,同时也带动了相关产业链的升级和转型。为满足电动汽车的充电需求,政府

和企业加大了对充电基础设施的投入,这不仅促进了新能源电力设施的完善,还推动了智能电网、储能技术等领域的创新和发展^[92]。

1.4.3 新能源与交通设备电气化推动节能减排

新能源与交通设备电气化的结合在节能减排方面发挥了重要作用。传统的燃油交通设备在运行中会产生大量的尾气排放和噪声污染,而电气化交通设备能够零排放、低噪声地运行。此外,新能源的使用能够进一步降低交通设备的能耗和运营成本。例如,电动汽车相较于燃油汽车具有更高的能量转化效率和更低的能耗,能够显著减少温室气体的排放^[93]。同时,智能电网和储能技术的应用还可以实现电能的优化调度和高效利用,进一步降低交通系统的能耗和排放。

1.4.4 新能源与交通设备电气化共同推动智能化、绿色化发展

新能源与交通设备电气化的结合也推动了交通系统的智能化、绿色化发展。大数据、物联网、云计算等现代信息技术的联合运用可以实现交通设备的智能调度、智能监控和智能维护,提高交通系统的运行效率和安全性^[94]。同时,新能源的使用也使交通设备在制造、使用过程中更加具备环保性、可持续性。

新能源与交通设备电气化的融合不仅为交通设备提供了更加清洁、高效的动力源泉,还推动了新能源的广泛应用和交通系统的智能化、绿色化发展。交通设备电气化发展中的新能源技术应用实例如表4所示。未来,随着技术的不断进步和政策的不断完善,新能源与交通设备电气化的结合将展现更广阔的前景和潜力。

交通与能源的融合发展驱动着交通体系迈向绿色、智能的新时代。清洁能源的广泛采用,如太阳能、风能等,在道路交通、水运航道及轨道交通中展现出巨大潜力,显著降低了交通领域的碳排放,实现了能源的可持续利用。储能技术的革新应用为交通系统提供了稳定的能源供应方案,无论对于公路交通中的车辆储能,还是对于交通服务区、轨道交通、港口及机场的大型储能设施,均有效提升了车辆和设施的能源利用效率,增强了系统的灵活性与可靠性。随着充换电设施的日益完善,迅猛发展的新能源汽车正逐步成为交通领

域的主力军。充电桩与换电站的广泛布局为新能源汽车的便捷充电与高效换电提供了坚实保障,进一步推动了新能源汽车的普及与应用。同时,交通设备的电气化趋势不仅为新能源提供了广阔的应用舞台,还促进了节能减排目标的实现,加速了交通行业的智能化、绿色化转型。这一系列变革重塑了交通行业的面貌,还推动了相关产业协同发展。政策引导、技术创新与社会各界的共同参与正汇聚成一股强大的力量,不断加快交通与能源融合发展的步伐,为构建更加绿色、智能、高效的交通体系奠定了坚实基础。

表4 新能源与交通设备电气化结合方式

Table 4 Combination modes of new energy and transportation equipment electrification

运用示例	描述
混合动力汽车	结合内燃机和电动驱动技术,兼具燃油汽车的续航能力和电动汽车的环保性。
燃料电池汽车	使用氢气与氧气发生化学反应产生电能驱动,零尾气排放,加氢时间短。
高速磁悬浮列车	基于磁悬浮技术的轨道交通,高速度、低能耗、低噪声。
光伏+交通应用	将光伏技术应用于交通设施,如光伏车棚、光伏充电桩,为交通设施提供绿色能源。
新能源公共交通工具	采用新能源驱动的公共交通工具,如电动巴士、有轨电车等,减少环境污染。
电动船舶	采用电力驱动的船舶,减少对化石燃料的依赖,降低船舶运营过程中的环境污染。
电动自行车与滑板车	轻便的电动交通工具,适用于短途出行,减少碳排放。
电动货车与物流车	应用于物流配送领域的电动车辆,降低物流行业的能耗和排放。
新能源飞机	探索使用电力、氢能等新能源驱动飞机,减少航空运输的碳排放。

2 电池技术推动交通能源融合发展

能源技术发展促进了交通能源融合,不断引领交能融合从初步融合走向全方位融合。当前,我国正处于科技创新驱动发展和产业升级转型的关键时期,交通行业与能源行业的融合日益迅速。在“双碳”目标的推动下,绿色交通飞速发展。打造交通能源融合发展、实现交通绿色低碳化转型,需要以新能源装备为核心,以先进的能源技术助推交通行业绿色发展。与能源交通密切相关的核心技术包括动力电池和储能技术。一方面,在交通出行领域,国内电动汽车领域在过去十多年里

实现了跨越式发展,拥有全球最大的电动汽车市场规模,同时产业的迅速发展与电动汽车技术创新密切相关,而且动力电池在能量密度、循环寿命、充电速度等方面不断取得技术突破;另一方面,交通基础设施领域开始利用交通基础设施开发利用风电、光伏等新能源,以实现交能融合。

近年来,基于交通基建的分布式能源、交通场景下的新型储能和能源输送等关键技术不断创新,加之储能技术在模块化、安全性、寿命等方面取得技术进步,导致储能装机爆发增长,同时带动了交通基建储能的全面发展。目前,各种能源核心技术的创新突破将加速推动交能融合产业的跨越式发展。新一轮的科技革命和技术产业创新也正在改变能源技术与供应结构,风电光伏、绿色氢能、动力电池、新型储能等各种新型能源技术在日新月异的科技创新背景下正迎来更新迭代,逐步成为交通与能源融合发展的内在驱动力。

本节针对不断发展的动力电池技术和新型储能技术展开概述。

2.1 锂动力电池技术

动力电池作为新能源汽车的核心部件,必须实现产业高质量发展^[95]。目前,新能源汽车的动力电池主要有以下几种类型:铅酸电池、镍镉和镍氢电池、锂离子电池、燃料电池、石墨烯电池^[96]、超级电容器^[97]等。其中的锂离子电池是目前应用最广泛的新能源汽车电池,具有能量密度高、寿命长、环保等优点,已被广泛用于纯电动汽车领域。

锂离子动力电池根据正极材料分为两类主流产品,即磷酸铁锂电池和三元锂离子电池。据国家能源局统计,上述两种电池占据目前中国电力车辆的总动力电池装机量的40%^[98]。

2.1.1 磷酸铁锂动力电池

磷酸铁锂电池是以磷酸铁锂为正极材料的锂离子电池,其能量密度一般为140~160 Wh/kg,最高可达180 Wh/kg。这类电池不含贵金属材料,成本较低,还具有输出效率高、放电电压平稳、安全性好(不燃烧、不爆炸)、循环寿命长、对环境无污染等优点。

目前,从各大电池厂商及新能源车企的发布信息来看,磷酸铁锂动力电池除成本优势外,其电池性能在近几年飞速提升。2020年,比亚迪发布

了刀片电池,该电池包采用磷酸铁锂技术,其体积能量密度与三元锂离子电池的接近。2023年,宁德时代对外发布了全球首款磷酸铁锂4C超充电电池—神行超充电电池,该电池在充电10 min后的续航里程为400 km,且拥有700 km的超长续航能力,还可在全工作温度范围内快充,目前已在多种车型上量产。2024年6月,吉利汽车正式发布了自研自产的最新一代“刀片式”磷酸铁锂电池—神盾短刀电池,该电池与目前行业中的“长刀电池”相比,其能量密度接近200 Wh/kg,在安全性能、循环寿命、快充能力和低温放电等多核心领域具有显著优势。目前,磷酸铁锂电池的能量密度逐渐接近三元锂,除了一些续航超过800 km的车型还需要三元锂离子动力电池,其他车型上的动力电池几乎都被磷酸铁锂电池取代。

2.1.2 三元锂离子动力电池

三元锂离子电池是以镍钴锰酸锂为正极材料、石墨为负极材料的锂离子电池。与磷酸铁锂动力电池相比,三元锂离子电池具有能量密度高、充电倍率高和低温性能好等优势。三元锂离子电池能量密度一般为180~230 Wh/kg,高镍三元锂离子电池可以达到250 Wh/kg,但是后者含钴等重金属元素,成本较高,且容易出现热失控的情况。2016年,在消费者对汽车续航能力有更高要求、政策向高能量密度电池倾斜的背景下,三元材料凭其高能量密度在乘用车领域突起。目前,三元锂离子电池应用于许多企业的车型,如极氪001全系的三种车型、理想汽车发布的理想ONE、蔚来的五款车型(ES6、ES8、EC6、ET7、ET5)、比亚迪汉的混动版车型、特斯拉Model 3与Model Y版本中的四驱车型。虽然,三元锂离子电池虽然在安全性和稳定性方面比磷酸铁锂电池略逊一筹,但他具有后者无法比拟的能量密度大、续航里程大和耐低温等优势。

动力电池产业作为绿色产业的重要组成部分,在“双碳”背景下迎来前所未有的发展机遇,形成了以三元锂离子电池和磷酸铁锂电池为主的发展路线^[75]。除此之外,“混掺”动力电池也逐渐出现在使用者视野中,如华为智界S7已同时搭载三元锂离子、磷酸锰铁锂离子电池。如今,我国动力电池产业及技术已达到世界领先水平,半固态电

池、钠离子电池等也开始进入产业化应用^[80,99]。近年来,我国不断加大对动力电池技术的研发和支持力度,使其产业规模不断扩大,从而为新能源汽车产业发展提供了技术支撑^[82]。未来,新能源汽车的高质量发展仍需在动力电池技术上进行两方面的突破:一方面,加速研发具有安全性能和高低温性能更优、成本更低的钠离子电池;另一方面,由已经成熟的液态电池向半固体电池、全固态电池发展^[99]。固态电池具有高能量密度、高安全性的优点,是未来动力电池发展的重要趋势^[73]。随着政府对新能源汽车的政策支持,新能源汽车产业发展也会推动动力电池逐步实现突破,向超快充、长续航、低成本、高安全的“全能”方向迭代^[95]。

2.2 液流电池储能技术

随着交通能源融合发展,城市新能源基础设施部署、新能源发电、绿色供电、光储一体化成为大势所趋。同时,交通的电气化进程加快,电网负荷侧冲击增大^[100-103],储能技术在交能融合中的作用逐渐凸显。随着光伏等新能源在交通领域加速布局推进,为更好地利用新能源,国内交通行业正在推广以“光伏+储能”为主体的降碳综合利用解决方案。近年来,核心储能技术得到了大量研究与应用,引领了交能融合。电化学储能技术以建设周期短、应用场景灵活、时间与空间因素不受限等特点得到广泛关注,同时兼顾了在交通行业的全环境应用^[104]。交通行业关乎国计民生,其安全性首当其冲。目前,液流电池在电化学储能技术中具有安全性高、易于模块化建设、循环寿命长的优势,在储能领域极具应用前景^[105-106]。液流电池储能技术的发展促进了能源在交通行业中的综合利用,推动交能融合迈向新高地。

2.2.1 液流电池组成及原理

液流电池由功率模块、容量模块和管路系统组成。液流电池的功率模块主要由电极、双极板、隔膜等组成,其中的隔膜把电池分为正、负极两个半电池,电极本身提供反应场所,而电化学反应发生在电解液与电极之间的固液界面,不发生在电极上;容量模块包括正、负极储液罐和正、负极电解液,决定了电池的容量。

液流电池的正、负极活性物质存储在电解液

储液罐中,通过泵机和管路循环输送到电池内部的正、负极电极上,再进行氧化还原反应。液流电池是通过溶解在电解液中的活性物质的氧化、还原反应来完成化学能与电能的相互转化,进而实现电能的存储与释放。液流电池在充电时,其正极发生氧化反应使活性物质价态升高,负极发生还原反应使活性物质价态降低;液流电池的放电过程与充电过程相反^[107]。

2.2.2 液流电池技术的发展

1974年,NASA的THALLER等^[108]提出了第一个真正意义上的液流电池体系,分别采用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$ 作为正极和负极氧化还原电对、硫酸作为电解质的铁铬液流电池,如图6(a)所示。长期研究表明, $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$ 负极电对存在电化学反应动力学速度低、析氢副反应严重的问题^[109]。此外,随着电池工作时间增加,正、负极电解液中的活性离子易出现严重交叉污染,造成铁铬液流电池容量快速衰减^[110]。1985年,澳大利亚新南威尔士大学SKYLLAS-KAZACOS等^[111]提出了以不同价态钒离子为电极、硫酸为电解质制备全钒液流电池体系,如图6(b)所示。全钒液流电池有效地避免了正、负极溶液交叉污染的问题^[112-115],但相比其他电池技术,仍存在钒原料成本相对较高、能量密度偏低等问题^[116-118]。这些问题严重限制了钒液流电池的大规模推广。

1977年,LIM等^[119]使用溴化锌电解质构建了锌溴液流电池,如图7(a)所示。该电池避免了活性物质的交叉污染,同时其电压达到1.82 V、能量密度较高,故在实际应用中极具优势。然而该电池的锌负极在充电过程中极易出现枝晶现象^[120],此外,该电池会产生有毒且易挥发的 Br_2 ,不仅造成严重的不可逆的容量衰减,还会对环境和公众健康产生影响。1979年,ADAMS^[121]以锌负极活性物质和铁氰化物正极活性材料构建了锌铁液流电池,大幅降低了材料成本,如图7(b)所示^[122]。2007年,CHENG等^[123]使用高浓度锌酸盐为负极电解质、氢氧化镍为正极活性物质,构建了锌镍液流电池。锌镍液流电池结构简单,有利于降低了成本,可以广泛应用在分布式储能领域。但该电池的正极氧化还原动力学较差,导致该电池难以在大电流密度下工作,进而电池功率密度较

低^[124-125]。此外,为大幅提升电池的能量密度,研究人员还研发了多种锌基液流电池,如锌碘液流电池体系^[126-128]、锌锰液流电池体系^[129]和锌钒液流电池体系^[130]等。然而,由于锌基液流电池负极涉及金属锌的沉积反应,电池的性能极易受到负极锌沉积的制约。所有锌液流电池体系都存在着锌枝晶问题,如图7(c)所示。因此,科研工作者需要调控锌负极区的电解液,改变负极锌在充电过程中的沉积形貌,从而获得均匀的锌沉积层,改善锌液流电池关键技术问题^[131-132]。

因固-液相沉积溶解的液流电池存在共性问题,研究人员设计了含卤素负极的液流电池体系。1983年,REMICK等^[133]首次将多硫化物应用在水系液流电池领域,搭建了多硫化物-溴体系的液流电池,然而溴电对的高渗透性和溴单质的有毒挥发性制约了电池发展。2015年,WEI等^[134]将铁氰化物/亚铁氰化物氧化还原电对用作正极、多硫化物用作负极,首次构建了铁硫液流电池体系。2021年,长沙理工大学贾传坤团队^[135]以 K_2S 为负极活性物质、不同价态的高溶解度铁基混合电解液为正极活性物质、中性KCl为支持电解质,首次构建了中性铁硫液流电池体系,如图8(a)所示。

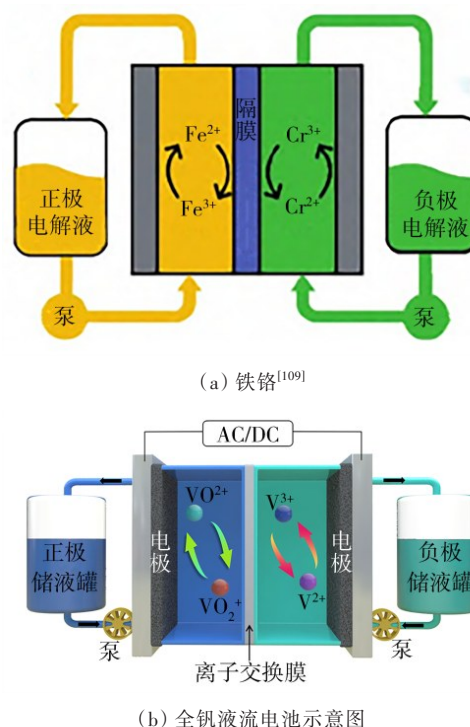
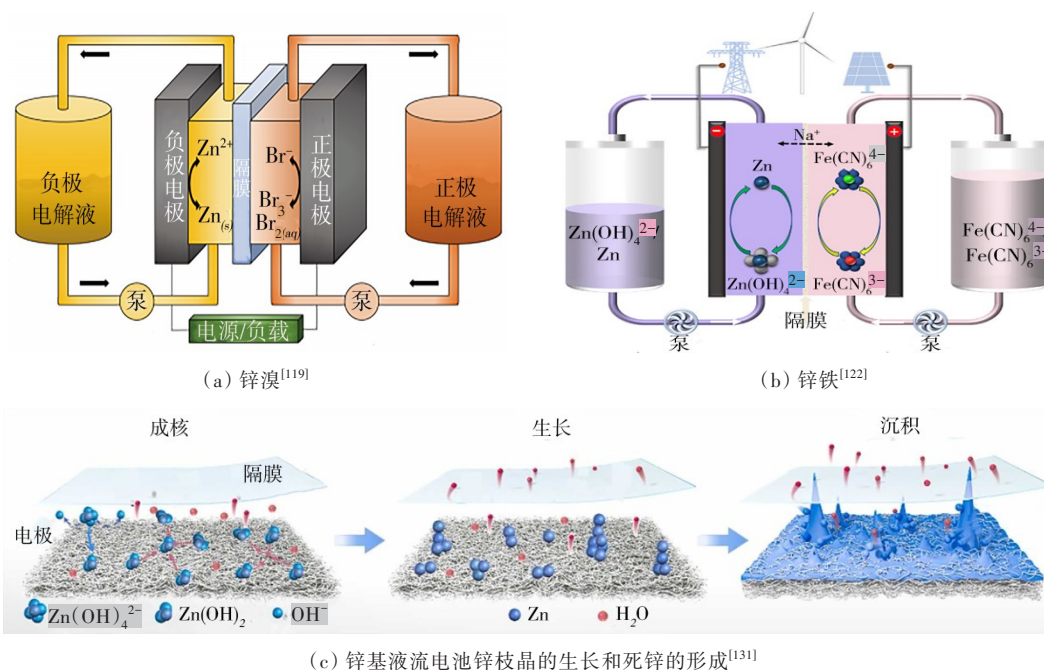


图6 铁铬与全钒液流电池示意图^[109]

Fig. 6 Iron-chromium and vanadium redox flow batteries^[109]

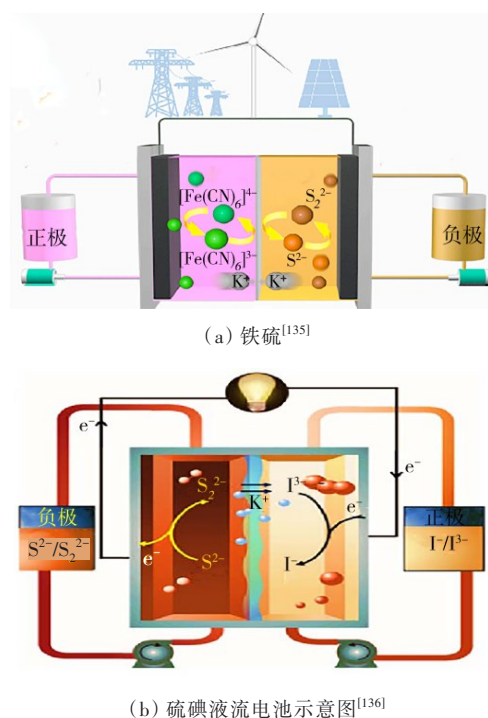
图7 锌基液流电池示意图^[119, 122, 131]Fig. 7 Zinc-based redox flow battery^[119, 122, 131]

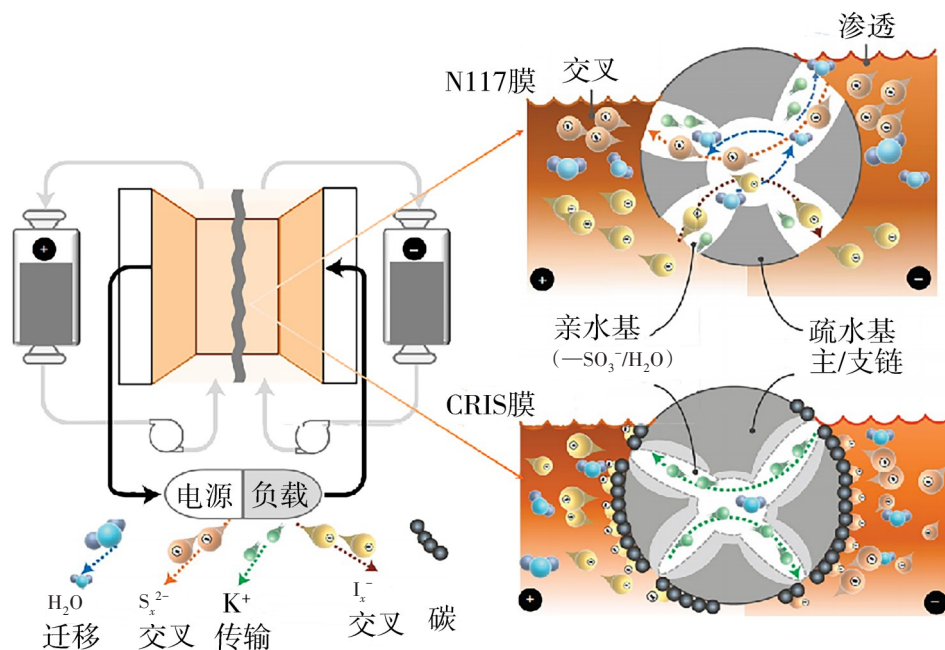
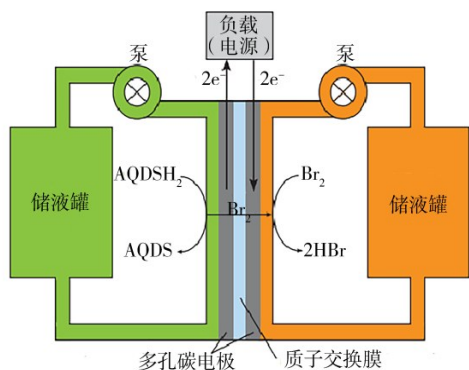
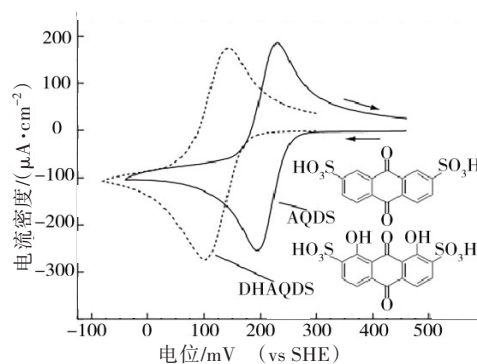
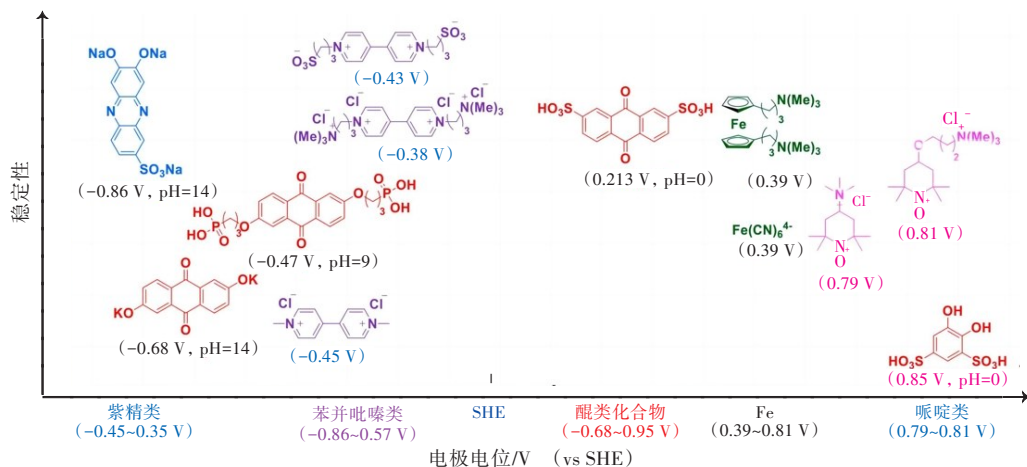
2016年,LI研究团队^[136]将高溶解度的碘化物用作正极材料,首次报道了多硫-碘液流电池体系,如图8(b)所示。因 K_2S_2 和KI的溶解度均极大,电池体系的理论能量密度达到85.4 Wh/L。2021年,LI团队^[137]再次基于多硫-碘体系制备了一种电荷增强离子选择性(charge-reinforced ion-selective, CRIS)膜,如图8(c)所示。该体系实现了负极多硫化物在膜表面的选择性吸附,有效避免了多硫化物和碘化物的交叉污染,大幅提升了多硫-碘体系的循环寿命。

2014年,哈佛大学AZIZ团队^[138]首次提出水系有机液流电池,以蒽醌二磺酸/二氢蒽醌二磺酸(anthraquinone disulfonic acid/dihydroanthraquinone disulfonic acid, AQDS/AQDSH₂)活性物质和溴/溴化氢(Br_2/HBr)配对构建液流电池,如图9(a)所示。AQDS分子在添加两个羟基(—OH)后转化为二羟基蒽醌二磺酸(dihydroxyl anthraquinone disulfonic acid, DHAQDS),后者的电位相对于前者的负移95 mV,如图9(b)所示,进而导致相应电池的电压数值比图9(a)中的增长11%。

电池体系若使用水作为溶剂,将对环境更友好,如图9(a)~9(b)所示。水系有机液流电池的正极活性分子主要包括二茂铁衍生物和2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物(2,2,6,6-tetramethyl piperidiny-

l-oxide, TEMPO)类衍生物,负极活性分子主要包括紫精类衍生物、醌类(苯醌、蒽醌、萘醌等)衍生物和含氮芳香杂环衍生物(咯嗪类、吩嗪类),其中负极活性分子的电极电位如图9(c)所示。在水系有机体系的性能研究中,研究人员着重进行了新型有机活性分子的合成,使用分子调控策略改变有机分子的官能团种类和位置,搭建新的电对,旨



(c) 不同隔膜组装的硫碘液流电池^[137]图8 硫基液流电池示意图^[135-137]Fig. 8 Sulfur-based redox flow battery^[135-137](a) AQDS/HBr水系有机液流电池示意图^[138](b) AQDS和DHAQDS的循环伏安曲线^[138](c) 有机液流电池活性物质电位^[139]图9 有机液流电池示意图及不同活性分子电位图^[138-139]Fig. 9 Organic redox flow battery and potential diagram of different active molecules^[138-139]

在提升有机分子在水中溶解度、增大电压窗口,以及改善因有机活性分子在电池循环过程中的分解而导致的电池容量快速衰减的问题。

2.3 交通固废材料与新能源电池融合技术

交通能源的融合发展催生出一批新技术,如道路沥青与新能源电池交叉利用的技术^[140-147]。截至2023年,全国公路里程超过 5.44×10^6 km。我国每年公路养护产生超过 2×10^8 t的废旧沥青混合料。这些道路沥青废料不仅浪费资源,还会对环境产生负面影响。

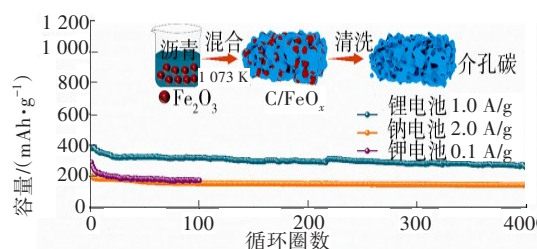
为解决交通领域的废旧沥青问题,长沙理工大学贾传坤开拓性地将废旧沥青与新能源电池有机融合在一起,提出基于废旧沥青的新能源电池材料,如图10所示。2021年,贾传坤团队首次将废旧沥青应用在锂、钠、钾离子电池中,如图10(a)~10(c)所示。该团队以废旧沥青为原材料,经过热处理和形貌调控,制备出具有三维孔状结构、高比表面积、优异性能的介孔碳材料,并将之用作锂离子电池负极材料,大幅提高了锂离子电池的比容量,明显改善了电池的稳定性^[140-144]。

此后,基于废旧沥青的较高比表面,贾传坤团队又开发了一种废旧沥青改性电极材料,并将之应用在液流电池中,如图10(d)所示。贾传坤团队将废旧沥青引入到碳毡电极表面,改善了液流电池电极的亲水性、导电性、对活性物质的催化活性及长期循环稳定性^[145-146]。

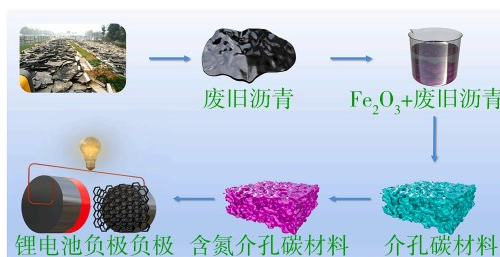
为了更好地利用交通固废材料,贾传坤团队设计了废旧沥青油石的分离设备和方法^[147-148],解决了交通固废材料的循环利用,并将这些油石分离后的沥青用作新能源电池材料,实现了将交通固废材料变废为宝的设想,促进了交通、能源的共同发展。废旧沥青在新能源中的资源化利用有效解决了交通行业中的固废问题、高碳排放环境污染和资源浪费的问题,也为研发高性能锂离子电池负极材料和液流电池电极材料提供了方向,助推了交通能源的深度融合。

在交通领域中,常见工程垃圾碳质泥岩(carbonaceous mudstone, MCM)通常用作建筑不良填料,因其成本低廉、资源丰富而备受关注。MCM具有强水理性、易风化、低强度及大变形等特点,极易在坡面发生由表及里的剥离、失稳,进而造成

不良影响。2019年,贾传坤团队通过酸化处理等改性方法,制备出具有优化质子传导通道的改性MCM。该改性MCM不仅保持了良好的导电性和化学稳定性,还表现出对钒离子的有效阻隔能力。因此贾传坤团队以磺化聚醚醚酮(sulfonated polyether ether ketone, SPEEK)为基体,结合MCM,通过分步分散、溶液浇注等成膜方法制备了SPEEK/



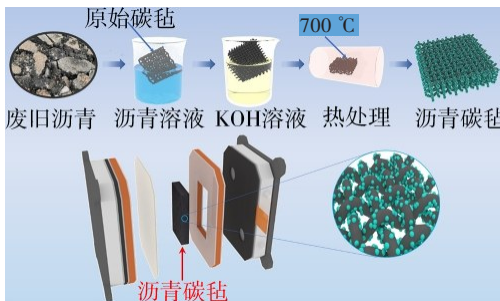
(a) 废旧沥青制备介孔碳负极材料用作锂离子电池^[140]



(b) 氮掺杂废旧沥青碳材料应用锂电负极^[141]



(c) 油石分离技术从废旧沥青中制备锂电负极碳材料^[144]



(d) 液流电池中的应用^[145]

图10 道路废旧沥青在锂、钠、钾电池和液流电池中的应用^[140-141, 144-145]

Fig. 10 Application of road waste asphalt in lithium, sodium, and potassium batteries and redox flow batteries^[140-141, 144-145]

MCM复合隔膜,并且通过测试发现改性MCM为质子提供了优化的传导通道,提高了隔膜的质子传导效率,有效阻隔了钒离子的渗透,减少了电池内部的自放电现象。SPEEK基体和MCM的结合提高了隔膜的整体机械强度和化学稳定性,确保了隔膜在电池长期运行中的可靠性。配备了SPEEK/MCM复合隔膜的电池在循环稳定性、能量效率等方面均表现出色,可广泛应用于全钒氧化还原液流电池等领域。

SPEEK/MCM复合隔膜技术为液流电池的发展提供了一种新的思路和方法。复合隔膜成本低、性能高,若将之应用于液流电池,可以进一步提高电池的能量密度、循环寿命和安全性能,推动液流电池在大规模储能领域的广泛应用。

节能减排已成为交通行业的共识,而开发降碳新技术是构建绿色交通的关键。废旧沥青循环利用技术是交通能源融合发展道路上的衍生新技术,有效推进了绿色交通的建设。未来,随着交通能源的进一步融合发展,更多的交通能源新技术必接踵而至。

2.4 光储充技术

近几年,随着电池技术发展,电化学储能技术也发展飞速,成为消纳新能源波动的关键技术。光储充一体化技术主要包括太阳能电池板、储能电池和充电桩三个部分,其中,太阳能电池板负责将太阳能转化为电能;储能电池负责储存电能并保证电能的稳定输出;充电桩负责将储存的电能转换为交流电或交流电,以用于给电动汽车等设备充电,实现能源领域向交通领域的融入。

光储充技术将光伏发电、储能和充电设施融为一体。在阳光充足的时段,光伏发电系统可将太阳能转化为电能,其中多余的电能将被存储在储能装备中,可为电动汽车提供充电服务。光储充一体化系统具有广泛的应用场景,包括电动汽车充电站、工业园区、商业建筑、住宅社区、偏远地区以及微电网等。在电动汽车充电站,光储充一体化系统可以为电动汽车提供快速充电服务,同时平衡电网负荷,以减少对电网的冲击;在工业园区和商业建筑,光储充一体化系统可以降低企业的用电成本,提高供电的可靠性;在住宅社区,光储充一体化系统可以为家庭用电提供绿色、可靠

的电源,也可为电动汽车提供充电服务;在偏远地区,光储充一体化系统可作为独立的能源供应系统,为当地居民提供稳定的电力;在微电网中,光储充一体化系统可作为核心组成部分,为微电网提供稳定的能源供应。此外,光储充一体化系统还可通过储能部分为电网提供调峰、调谷等辅助服务,以提高电网的运行效率,如张家港德泰储能装备有限公司在矿区建设的2.205 MWp+1.5 MW/6.0 MWh光储一体化项目,可给煤矿生产提供能源供应。该项目利用太阳能电池板将丰富的光伏资源转化为电能,其储能电池为全钒液流电池,具备高安全、长寿命和长时储能优势。

新能源技术的发展推动了交通、能源的充分融合,各种新兴技术正以前所未有的速度引领着这一领域的变革与进步。

1) 在锂离子动力电池技术方面,磷酸铁锂动力电池因其高安全性、长循环寿命及相对较低的成本,在公共交通、物流运输等领域得到广泛应用,为城市交通的绿色化作了重要贡献。同时,三元锂离子动力电池凭借其高能量密度、快速充放电能力等优势,在乘用车市场占据一席之地,满足了消费者对续航里程和充电效率的高要求。

2) 液流电池储能技术以模块化设计、长寿命、易于扩展等特点,在交通领域展现出了巨大的应用潜力。从电网侧到用户侧,液流电池都能提供稳定、可靠的储能解决方案,有效缓解了交通设施对电网的压力,提升了能源利用效率。而且,随着技术的不断成熟和成本的进一步降低,液流电池储能技术有望在未来交通能源体系中发挥更加重要的作用。

3) 交通固废材料与新能源电池的融合技术是近年的一大亮点。将交通领域产生的废弃物转化为电池材料,不仅实现了废物的资源化利用,还降低了新能源电池的生产成本,促进了循环经济的发展。这种技术创新不仅有助于缓解资源短缺问题,还推动了新能源产业的绿色、可持续发展。

4) 光储充技术的兴起为交通能源融合发展注入了新的活力。通过太阳能发电、储能系统与充电设施的有机结合,光储充技术为新能源汽车提供了清洁、便捷的能源来源,降低了对传统能源的依赖。这种技术的广泛应用有助于加速交通行业

的绿色转型,推动实现交通、能源的深度融合与协同发展。

3 总结与展望

本文总结了当前交通与能源融合发展的领域与现状,并概述了交通能源融合的关键新能源技术(锂离子动力电池和液流储能电池),提倡发展新能源技术,打造交通行业低碳化转型,实现绿色交通。交通和能源行业是践行“双碳”目标的关键领域,交通和能源的融合发展需要两个行业不断技术创新,以更多的技术发展打破行业壁垒,实现交通与能源行业的绿色融合、低碳化发展。

3.1 交能融合的现状

在“双碳”目标的推行下,各类新能源技术取得关键性突破,新能源的规模化应用改变了能源结构,极大地影响了我国交通行业的发展方式。相关具体表现为,一是在海陆空交通领域,依托各类交通基础设施,综合利用清洁能源,融入风电、光伏等清洁能源,实现交通沿线用电的清洁替代和低碳化转型;二是我国交通设施多,各种环境复杂,清洁能源应用存在限制,应建设储能一体化来综合利用交通行业清洁能源,以源网荷储一体化推进交通低碳化转型发展;三是锂离子电池在能量密度、充放电速度、循环寿命方面的技术革新,决定了新能源电车的续航时间、充放电时间等关键因素,进而导致以锂离子电池为主的新能源电池的技术发展,促进了新能源电动汽车产业的飞速发展,正在逐步改变汽车发展格局。

3.2 交能融合存在的挑战

交通与能源的融合发展被认为是推动交通行业高质量发展、实现“双碳”目标的重要途径,但目前仍处在起步阶段。交通与能源的融合发展在实际应用中存在多方面的挑战和忽视,主要表现如下:

1) 基础设施建设不完善。能源网络配套不健全,新能源发电设施的接入和能源网络的互联互通需进一步加强,以实现高效、稳定的能源供应。

2) 技术瓶颈与成本存在问题。当前问题主要表现为,一是当前电动汽车的续航里程和充电时间仍不能完全满足市场需求,影响了用户体验;二

是新能源技术的研发、生产及应用成本仍高于传统能源技术,必须继续加大技术创新和规模化生产以降低成本。

3) 综合规划与顶层设计不完善。目前交通与能源融合发展的综合规划与顶层设计还不够完善,导致在实施过程中容易出现各自为政、缺乏协同的情况,因此需要加强跨部门、跨行业的协同规划与顶层设计,以推动交通与能源的深度融合。

4) 区域协调发展不均衡。在推进交通与能源融合发展的过程中,不同区域之间的发展水平存在较大差异,甚至在某些情况下,一些中西部地区在能源基础设施和交通网络建设上相对滞后,影响了整体融合发展进程。

5) 人才培养与储备不足。交通与能源融合发展需要具备跨学科知识和创新能力的复合型人才。当前,这方面的人才培养与储备还不够充分,而解决这些挑战和问题需要政府、企业和社会各界的共同努力和持续投入。

3.3 未来展望

交通与能源融合发展是减少碳排放和推动两个行业向高质量低碳化转型发展的重要方向。目前,我国交通领域布局广泛,对能源的需求,尤其对清洁能源的需求巨大,具备较大的清洁能源应用潜力和突出的交能融合发展潜力。

交通与能源的融合发展需要加快进程,主要需要解决以下相关问题:

1) 做好交通与能源领域基础设施建设,充分利用现有资源,建设交通基础设施与清洁能源利用设施,为交通能源融合奠定基础。

2) 加快推进交通设施的电动化发展,实现运载设备、交通工具的电动化替代,确保各类运载设施的绿色化发展。

3) 将传统能源行业与电力企业融入储能建设,利用煤炭、电力行业优势,积极推进风光储充一体化发展,将清洁能源融入道路交通,实现发电、储能、电动汽车充电的联合发展。

4) 突破关键技术,实现技术创新。交通与能源融合的内在驱动力是技术创新,因此有必要通过在交通和能源两个行业加快技术攻关,实现关键技术装备的更新迭代,为交通能源融合发展提供强有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1] 李晓易,谭晓雨,吴睿,等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15-21. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.008.
LI Xiaoyi, TAN Xiaoyu, WU Rui, et al. Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 15-21. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.008.
- [2] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586(7830): 482-483. DOI: 10.1038/d41586-020-02927-9.
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2024. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on National Economic and Social Development for 2023 [R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2024. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [4] 武雅君.“双碳”目标下我国清洁能源发电现状及发展趋势[J]. 电气技术与经济, 2023(1): 121-124. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2023.01.033.
WU Yajun. The current status and future trends of clean energy generation in China under the “Dual Carbon” goal[J]. Electrical Equipment and Economy, 2023(1): 121-124. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2023.01.033.
- [5] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices[J]. Science, 2011, 334(6058): 928-935. DOI: 10.1126/science.1212741.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[R]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府, 2021. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
The Central Government of People's Republic of China. Opinions of The Central Committee of the Communist Party of China and The State Council on the complete, accurate and comprehensive implementation of the new development concept to do a good job of carbon peak carbon neutrality [R]. Beijing: Central Government of People's Republic of China, 2021. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [7] 詹倩.“双碳”背景下交通运输行业的风险挑战与对策研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(3): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.03.009.
ZHAN Qian. Study on the risks and solutions for transportation industry under carbon peak and neutrality goals [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, 19(3): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.03.009.
- [8] 张林鹏,黄萍,朱佳琪,等. 交通运输行业碳排放研究进展[J]. 能源研究与管理, 2023(4): 76-84. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2023.04.012.
ZHANG Linpeng, HUANG Ping, ZHU Jiaqi, et al. Research progress on carbon emissions of transportation industry [J]. Energy Research and Management, 2023(4): 76-84. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2023.04.012.
- [9] 陆旭东,江山,张晓峰,等. 分布式光伏-公路交通多场景融合发展潜力研究与展望[J]. 公路, 2024, 69(6): 204-211.
LU Xudong, JIANG Shan, ZHANG Xiaofeng, et al. Research and prospects on the integration potential of distributed photovoltaics and multi-scenario development in highway transportation [J]. Highway, 2024, 69(6): 204-211.
- [10] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering Research·2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
- [11] 戴家权,彭天铎,韩冰,等.“双碳”目标下中国交通部门低碳转型路径及对石油需求的影响研究[J]. 国际石油经济, 2021, 29(12): 1-9.
DAI Jiaquan, PENG Tianduo, HAN Bing, et al. Research on the low-carbon transformation path of China's transportation sector and its impact on oil demand under the “Dual Carbon” goal [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(12): 1-9.
- [12] 汪光焘,王婷. 贯彻《交通强国建设纲要》,推进城市交通高质量发展[J]. 城市规划, 2020, 44(3): 31-42. DOI: 10.11819/cpr20200306a.
WANG Guangtao, WANG Ting. Implementing The Outline for Building a Powerful Nation in Transportation and promoting high-quality development of urban transportation [J]. City Planning Review, 2020, 44(3): 31-42. DOI: 10.11819/cpr20200306a.
- [13] 陈胜营. 贯彻落实《交通强国建设纲要》奋力开创交通规划新局面[J]. 中国水运, 2021(2): 20-21. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.02.009.
CHEN Shengying. Implement The Outline for Building a Powerful Nation in Transportation and striving to create a new situation in transportation planning [J]. China Water Transport, 2021(2): 20-21. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.02.009.
- [14] 中共中央,国务院.《交通强国建设纲要》[N]. 中国交通报, 2019-09-20(4).
The CPC Central Committee and The State Council. The Outline for Building a Powerful Nation in Transportation

- [N]. China Communications News, 2019-09-20(4).
- [15] 胡海涛,郑政,何正友,等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 12-24, 339. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171969. HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24, 339. DOI: 10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 171969.
- [16] 杨勇平,武平,程鹏,等. 我国陆路交通能源系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 153-162. YANG Yongping, WU Ping, CHENG Peng, et al. Development strategy for energy system of land transport in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 153-162.
- [17] 蔡凤田. 公路交通运输领域节能减排对策[J]. 交通节能与环保, 2008, 4(2): 36-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2008.02.012. CAI Fengtian. Countermeasures of energy saving and emission reduction in highway transportation field[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2008, 4(2): 36-44. DOI: 10.3969/j.issn. 1673-6478.2008.02.012.
- [18] 本刊编辑部. 新时代交通强国铁路先行规划纲要[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(9): 1-6, 24. Editorial Department of "Railway Quality Control". The Outline of powerful nation railway advance planning in the new era[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(9): 1-6, 24.
- [19] 伍朝辉,武晓博,王亮. 交通强国背景下智慧交通发展趋势展望[J]. 交通运输研究, 2019, 5(4): 26-36. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2019.04.003. WU Zhaohui, WU Xiaobo, WANG Liang. Prospect of development trend of smart transportation under the background of building China into a country with strong transportation network[J]. Transport Research, 2019, 5(4): 26-36. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931. 2019. 04.003.
- [20] 陆化普,冯海霞. 交通领域实现碳中和的分析与思考[J]. 可持续发展经济导刊, 2022(增刊1): 63-67. LU Huapu, FENG Haixia. Analysis and thinking of carbon neutrality in transportation field [J]. China Sustainability Tribune, 2022(sup 1): 63-67.
- [21] 李连成,吴文化. 我国交通运输业能源利用效率及发展趋势[J]. 综合运输, 2008, 30(3): 16-20. LI Liancheng, WU Wenhua. Energy utilization in China's transportation industry efficiency and development trends[J]. Comprehensive Transportation, 2008, 30(3): 16-20.
- [22] 师瑞峰,宁津,高毓钦,等. 含氢储能的公路交通风光自洽微网系统优化调度策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 513-521. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1066. SHI Ruifeng, NING Jin, GAO Yuqin, et al. Research on optimal dispatch strategy of wind and solar self-consistent microgrid in road transportation system with hydrogen energy storage [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(11): 513-521. DOI: 10.19912/j. 0254-0096.tynxb.2022-1066.
- [23] 唐六九,史龙,黄磊,等. 高速公路路域光伏设施的影响分析和对策[J/OL]. 综合运输, (2024-02-28) [2024-08-05]. [https://link.cnki.net/urlid/11.1197.u. 20240228.0913.004](https://link.cnki.net/urlid/11.1197.u.20240228.0913.004). TANG Liujiu, SHI Long, HUANG Lei, et al. Impact analysis and countermeasures of photovoltaic facilities in expressway area [J/OL]. China Transportation Review, (2024-02-28) [2024-08-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1197.u.20240228.0913.004>.
- [24] 韩悦,李佳静,乔宇,等. 城轨混合储能系统控制策略综述与展望[J/OL]. 电源学报, (2024-04-26) [2024-08-05]. [https://link.cnki.net/urlid/12.1420. tm. 20240426.1021.022](https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240426.1021.022). HAN Yue, LI Jiajing, QIAO Yu, et al. Review and prospect of control strategies for urban rail hybrid energy storage systems [J/OL]. Journal of Power Supply, (2024-04-26) [2024-08-05]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240426.1021.022>.
- [25] 李柯,何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049-1054. DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.09.004. LI Ke, HE Fanneng. Analysis on China's mainland's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1049-1054. DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.09.004.
- [26] 贾利民. 中国陆路交通基础设施资产能源化潜力研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020. JIA Limin. Energization potential of ground transportation infrastructure assets in China [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [27] 王峥,任毅. 我国太阳能资源的利用现状与产业发展[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 89-92. DOI: 10.13776/j.cnki.resourcesindustries.2010.02.007. WANG Zheng, REN Yi. Utilization and development of solar energy industry in China [J]. Resources & Industries, 2010, 12(2): 89-92. DOI: 10.13776/j. cnki.resourcesindustries.2010.02.007.
- [28] 王炳忠,张富国,李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9. DOI: 10.19912/j.0254-0096.1980.01.002. WANG Bingzhong, ZHANG Fuguo, LI Lixian. Solar energy resources in China [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1980, 1(1): 1-9. DOI: 10.19912/j.0254-0096. 1980.01.002.
- [29] 贾利民,程鹏,张蜚,等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J]. 中国工程科学,

- 2022, 24(3): 173-183. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.018.
- JIA Limin, CHENG Peng, ZHANG Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: development paths and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 173-183. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.018.
- [30] 朱蓉,王阳,向洋,等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409-418. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130.
- ZHU Rong, WANG Yang, XIANG Yang, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 409-418. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130.
- [31] 李昊璋,刘苹元,王锦鸿,等. 我国风电产业的发展现状分析及未来展望[J]. 机电信息, 2020(21): 91-94. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2020.21.045.
- LI Haozhang, LIU Pingyuan, WANG Jinhong, et al. Analysis of the development status quo and the future prospect of China's wind power industry [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(21): 91-94. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2020.21.045.
- [32] 贺德馨. 中国风能发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 95-100. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2011.06.014.
- HE Dexin. Research on China's wind energy development strategy [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(6): 95-100. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2011.06.014.
- [33] 李艳,王元,汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 280-291.
- LI Yan, WANG Yuan, TANG Jianping. Temporal and spatial variety characteristics in near-surface wind energy in China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2007, 43(3): 280-291.
- [34] 申宽育. 中国的风能资源与风力发电[J]. 西北水电, 2010(1): 76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2010.01.020.
- SHEN Kuanyu. Wind energy resources and wind power generation in China [J]. Northwest Hydropower, 2010(1): 76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2010.01.020.
- [35] 周荣卫,何晓凤,朱蓉,等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1434-1443.
- ZHOU Rongwei, HE Xiaofeng, ZHU Rong, et al. Numerical simulation of the development potential of wind energy resources over China's offshore areas [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1434-1443.
- [36] HANK J. Solar Serpents in Paradise/Mans Tham [N]. ArchDaily, 2010-11-15(2).
- [37] 潘军,吴红斌,许道强,等. 光伏/电动汽车/负荷博弈的屋顶光伏容量优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(01): 186-193. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20181017.1433.002>.
- PAN Jun, WU Hongbin, XU Daogiang, et al. Capacity optimization of roof top photovoltaic based on photovoltaic/electric vehicle/load game [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(01): 186-193. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20181017.1433.002>.
- [38] 李军军,吴政球,谭勋琼,等. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-72. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2011.08.014.
- LI Junjun, WU Zhengqiu, TAN Xunqiong, et al. Review of wind power generation and relative technology development [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-72. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2011.08.014.
- [39] 杨鹏浩,陈诗璇,肖建伟. 高速公路边坡太阳能研究现状及发展展望综述[J]. 科技与创新, 2020(17): 19-21, 23. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2020.17.007.
- YANG Penghao, CHEN Shixuan, XIAO Jianwei. Overview of the research status and development prospect of solar energy on highway slope [J]. Science and Technology & Innovation, 2020(17): 19-21, 23. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2020.17.007.
- [40] 蔡玮. “光伏+高速公路”新能源开发方案探讨[J]. 电工技术, 2022(18): 39-40, 43. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.013.
- CAI Wei. Discussion on new energy development mode of “photovoltaic+expressway” [J]. Electric Engineering, 2022(18): 39-40, 43. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.013.
- [41] SOVACOL B K, KESTER J, NOEL L, et al. Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 109963. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109963.
- [42] 朱继忠,何晨可,陈婧韵,等. 综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 14-32. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.01.002.
- ZHU Jizhong, HE Chenke, CHEN Jingyun, et al. Overview of electric vehicle charging and swapping facilities planning under the environment of integrated energy system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 14-32. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.01.002.
- [43] 毛保华,卢霞,黄俊生,等. 碳中和目标下氢能源在我国运输业中的发展路径[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 234-243. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.06.027.
- MAO Baohua, LU Xia, HUANG Junsheng, et al. On

- development path of hydrogen energy technology in China's transportation system under carbon neutrality goal[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6): 234-243. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.06.027.
- [44] 师瑞峰, 李少鹏. 电动汽车 V2G 问题研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 28-37. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000060.
- SHI Ruifeng, LI Shaopeng. Review on studies of V2G problem in electric vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 28-37. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000060.
- [45] 翁国庆, 张有兵, 戚军, 等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的 V2G 可用容量评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 36-45. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2014.08.005.
- WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 36-45. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2014.08.005.
- [46] 梁宇. 新能源汽车在交通运输行业的推广应用策略研究[J]. 运输经理世界, 2022(4): 157-159. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3681.2022.04.052.
- LIANG Yu. Research on the promotion and application strategy of new energy vehicles in the transportation industry [J]. Transport Business China, 2022(4): 157-159. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3681.2022.04.052.
- [47] 陈丽, 徐展, 徐峰达, 等. 交通枢纽节点的交能融合系统建设路径研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(10): 130-132. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012.
- CHEN Li, XU Zhan, XU Fengda, et al. Research on the construction path of the intersection energy fusion system of transportation hub nodes [J]. Low Carbon World, 2022, 12(10): 130-132. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012.
- [48] 石文秀, 霍明, 吴金泽. 浅谈综合性交通枢纽的应用与发展[J]. 四川水泥, 2017(3): 299. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6344.2017.03.263.
- SHI Wenxiu, HUO Ming, WU Jinze. On the application and development of comprehensive transportation hub [J]. Sichuan Cement, 2017(3): 299. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6344.2017.03.263.
- [49] 丁晓宁. 基于“双碳”目标的城际铁路车站电气设计[J]. 铁道建筑技术, 2023(10): 123-127.
- DING Xiaoning. Electrical design of intercity railway station based on carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Railway Construction Technology, 2023(10): 123-127.
- [50] 黎俊杰. 新型储能技术在城市轨道交通行业的应用及展望[J]. 机电信息, 2023(22): 86-88. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2023.22.023.
- LI Junjie. Application and prospect of new energy storage technology in urban rail transit industry [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(22): 86-88. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2023.22.023.
- [51] 杨俭, 李发扬, 宋瑞刚, 等. 城市轨道交通车辆制动能量回收技术现状及研究进展[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 26-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2011.02.005.
- YANG Jian, LI Fayang, SONG Ruigang, et al. Review of the utilization of vehicular braking energy in urban railway transportation [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 26-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2011.02.005.
- [52] 李子华. 打造低碳生态经济新模式:“光伏治沙-绿电制氢-氢产业延伸”的创新与发展[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(21): 165-167. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2022-21-57.
- LI Zihua. Creating a new model of low-carbon ecological economy-innovation and development of “photovoltaic sand control-green electricity hydrogen production-hydrogen industry extension” [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2022, 3(21): 165-167. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2022-21-57.
- [53] 刘阳春, 彭惠民. 世界电气化铁路发展的最新趋势[J]. 世界产品与技术, 1996(3): 34-36.
- LIU Yangchun, PENG Huimin. Latest trends for the development of the world's electrified railways [J]. Electronic Component News, 1996(3): 34-36.
- [54] 伍赛特. 氢燃料在铁路运输领域的应用可行性分析及前景展望[J]. 上海节能, 2024(5): 784-793. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2024.05.009.
- WU Saite. Feasibility analysis and prospect of hydrogen fuel application in railway transportation field [J]. Shanghai Energy Saving, 2024(5): 784-793. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2024.05.009.
- [55] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
- LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [56] 颜姜慧. 智慧交通系统自组织演化视角下智能汽车发展路径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.000608.
- YAN Jianghui. Research on the development path of intelligent vehicle from the evolution of smart transportation self-organizing system perspective [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.000608.
- [57] 黄迪. 物联网的应用和发展研究[D]. 北京: 北京邮

- 电大学, 2011.
- HUANG Di. Research on the application and future of the internet of things[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [58] 刘坚. 储能技术在交通领域的应用与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(4): 410-420, 421. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.04.009.
- LIU Jian. Application and development trends of energy storage technology in the field of traffic [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(4): 410-420, 421. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.04.009.
- [59] 齐洪峰. 飞轮储能与轨道交通系统技术融合发展现状[J]. 电源技术, 2022, 46(2): 137-140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2022.02.008.
- QI Hongfeng. Progress of technology integration between flywheel energy storage and rail transportation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(2): 137-140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2022.02.008.
- [60] 王旭燕, 唐亮. 大数据背景下智慧交通规划建设的发展[J]. 城市建设理论研究, 2024(13): 220-222. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202413073.
- WANG Xuyan, TANG Liang. Development of smart transportation planning and construction in the context of big data [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2024(13): 220-222. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202413073.
- [61] 金勇, 黄先进, 石春珉, 等. 城市轨道交通地面储能技术应用综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231712.
- JIN Yong, HUANG Xianjin, SHI Chunmin, et al. Review on wayside energy storage technology for urban rail transit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231712.
- [62] 张华民. 全钒液流电池储能技术及其应用[C]//中国化学会第30届学术年会摘要集:第三十分会:化学电源. 大连:中国科学院大连化学物理研究所, 2016:11.
- ZHANG Huamin. Vanadium liquid flow battery energy storage technology and its application [C]//Summary of the 30th Annual Conference of Chinese Chemical Society: the third tenth conference: Chemical Power Supply. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016:11.
- [63] 李建林, 徐少华, 刘超群等. 储能技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
- LI Jianlin, XU Shaohua, LIU Chaoqun, et al. Energy storage technology and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [64] YANG Z G, ZHANG J L, KINTNER-MEYER M C W, et al. Electrochemical energy storage for green grid[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3577-3613. DOI: 10.1021/cr100290v.
- [65] ZHU Z X, JIANG T L, ALI M, et al. Rechargeable batteries for grid scale energy storage [J]. Chemical Reviews, 2022, 122(22): 16610-16751. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00289.
- [66] 中华人民共和国交通运输部. 关于招商局集团有限公司开展集装箱码头智能化升级改造等交通强国建设试点工作的意见[R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2020.
- Ministry of Transport of People's Republic of China. Opinions on the pilot work of China Merchants Group Co., Ltd. to carry out the intelligent upgrading and transformation of container terminals and other transportation power construction [R]. Beijing: Ministry of Transport of People's Republic of China, 2020.
- [67] 张健宇, 杨益荣, 杨军志, 等. 光储直柔技术在高速服务区的探索与应用[J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(4): 137-140.
- ZHANG Jianyu, YANG Yirong, YANG Junzhi, et al. The exploration and research of PEDF in high-speed service area [J]. Green Construction and Intelligent Building, 2024(4): 137-140.
- [68] 闻佳, 李文军, 杨军志. 基于源网荷储的高速公路服务区智慧能源管理平台[J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(1): 7-9, 13.
- WEN Jia, LI Wenjun, YANG Junzhi. Intelligent energy management platform for expressway service area based on source network load storage [J]. Green Construction and Intelligent Building, 2024(1): 7-9, 13.
- [69] 李玉光, 刘翔, 梁艳召, 等. 飞轮储能装置在轨道交通中的应用研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2679-2686. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0214.
- LI Yuguang, LIU Xiang, LIANG Yanzhao, et al. Research on the application of flywheel energy storage device in rail transit [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8): 2679-2686. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0214.
- [70] CHEN Xuli, PAUL Rajib, DAI Liming. Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage [J]. National Science Review, 2017, 4(3): 453-489. DOI: 10.1093/nsr/nwx009.
- [71] PULLEN K R. The status and future of flywheel energy storage [J]. Joule, 2019, 3(6): 1394-1399. DOI: 10.1016/j.joule.2019.04.006.
- [72] 北极星储能网. 港口储能运行模式及代表案例[EB/OL]. 北极星储能网. (2018-09-27) [2024-08-05]. http://www.china-nengyuan.com/exhibition/exhibition_news_129429.html.
- Chuneng. bjx.com.cn. Port energy storage operation

- mode and representative cases [EB/OL]. Chuneng.bjx.com.cn. (2018-09-27) [2024-08-05]. http://www.china-nengyuan.com/exhibition/exhibition_news_129429.html.
- [73] 温冲, 于建平. 新能源汽车发展开启“加速模式”[N]. 华夏时报, 2024-06-03(1).
- WEN Chong, YU Jianping. New energy vehicle development opens “acceleration mode” [N]. China Times, 2024-06-03(1).
- [74] 袁菁芸. “双碳”目标下扬州新能源汽车产业高质量发展路径研究[J]. 科技创新与生产力, 2024(5): 59-62.
- YUAN Jingyun. Research on the path of high-quality development of new energy vehicle industry in Yangzhou under the “Dual Carbon” goals [J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2024(5): 59-62.
- [75] 罗剑, 赵二牛. “双碳”背景下新能源汽车产业发展研究[J]. 中国商论, 2024(8): 128-131. DOI: 10.19699/j.cnki.issn2096-0298.2024.08.128.
- LUO Jian, ZHAO Erniu. Research on the development of new energy vehicle industry under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. China Journal of Commerce, 2024(8): 128-131. DOI: 10.19699/j.cnki.issn2096-0298.2024.08.128.
- [76] 孙远涛, 王云龙, 朱荣福, 等. 新能源汽车技术及其产业发展现状[J]. 内燃机与配件, 2022(16): 118-120. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2022.16.003.
- SUN Yuantao, WANG Yunlong, ZHU Rongfu, et al. Study on new energy vehicle technology and industry development status [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(16): 118-120. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2022.16.003.
- [77] ZHOU J Y. Research status of new energy vehicles in various countries and the significance of new energy vehicles [J]. Applied and Computational Engineering, 2023, 12(1): 199-205. DOI: 10.54254/2755-2721/12/20230339.
- [78] 王品. 中国新能源汽车发展现状及对策建议[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(8): 187-191. DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2024.008.036.
- WANG Pin. China's new energy vehicle development status and countermeasures suggestions [J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(8): 187-191. DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2024.008.036.
- [79] 罗桂成, 盛春龙. 浅析新能源汽车的未来发展趋势[J]. 时代汽车, 2022(21): 105-107. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2022.21.036.
- LUO Guicheng, SHENG Chunlong. Analysis of the future development trend of new energy vehicles [J]. Auto Time, 2022(21): 105-107. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2022.21.036.
- [80] 张永伟. 2024年中国新能源汽车产业发展趋势[J]. 中国国情国力, 2024(3): 31-35. DOI: 10.13561/j.cnki.zggqgl.2024.03.008.
- ZHANG Yongwei. The development trend of China's new energy vehicle industry in 2024 [J]. China National Conditions and Strength, 2024(3): 31-35. DOI: 10.13561/j.cnki.zggqgl.2024.03.008.
- [81] 张葵葵. 国内外电动汽车充换电设施标准及应用现状(上)[J]. 汽车维修与保养, 2020(12): 61-64. DOI: 10.13825/j.cnki.motorchina.2020.12.016.
- ZHANG Kuikui. Standard and Application status of charging and changing facilities for electric vehicles at home and abroad (I) [J]. Automobile Maintenance & Repair, 2020(12): 61-64. DOI: 10.13825/j.cnki.motorchina.2020.12.016.
- [82] 王娟, 洪畅, 刘菁昊. 新能源汽车动力电池应用现状及发展探析[J]. 时代汽车, 2024(3): 77-79.
- WANG Juan, HONG Yang, LIU Jinghao. Analysis on the application status and development of power batteries for new energy vehicles [J]. Auto Time, 2024(3): 77-79.
- [83] SHAHED M T, RASHID A B M H U. Battery charging technologies and standards for electric vehicles: a state-of-the-art review, challenges, and future research prospects [J]. Energy Reports, 2024, 11: 5978-5998. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.05.062.
- [84] 周进, 王涛. 新能源汽车充电桩现状分析[J]. 中国计量, 2023(7): 56-58, 65. DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2023.07.013.
- ZHOU Jin, WANG Tao. Analysis of new energy vehicle charging pile [J]. China Metrology, 2023(7): 56-58, 65. DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2023.07.013.
- [85] 付若琪, 薛婧怡, 郭玉琦, 等. 中国新能源汽车充电桩设施发展现状及建议[J]. 时代汽车, 2024(8): 130-132.
- FU Ruqi, XUE Jingyi, GUO Yuqi, et al. Development status and suggestions of charging pile facilities for new energy vehicles in China [J]. Auto Time, 2024(8): 130-132.
- [86] 郑义恒, 刘良旭, 刘燕. 新建高速公路服务区新能源汽车充电桩建设探讨[J]. 西部交通科技, 2021(6): 206-208. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2021.06.058.
- ZHENG Yiheng, LIU Liangxu, LIU Yan. Discussion on the construction of new energy vehicle charging pile in the new expressway service area [J]. Western China Communications Science & Technology, 2021(6): 206-208. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2021.06.058.
- [87] 徐西岳, 肖建成. 新能源汽车充电设施发展思考[J]. 中国电力企业管理, 2023(24): 68-69.
- XU Xiyue, XIAO Jiancheng. Thinking on the development of new energy vehicle charging facilities [J]. China Power Enterprise Management, 2023(24): 68-69.
- [88] 吴博峰. 以技术创新助力新能源汽车发展[N]. 中国消费者报, 2024-01-09(3).
- WU Bofeng. Technological innovation to promote the

- development of new energy vehicles [N]. Securities Times, 2024-01-09(3).
- [89] 周爱敏,王智渊,李喆.电动汽车充换电设施产业发展研究[J].江苏科技信息,2011(10):7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7530.2011.10.003.
- ZHOU Aimin, WANG Zhiyuan, LI Zhe. Research on industry development of electric vehicle charging and replacing facilities [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2011(10):7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7530.2011.10.003.
- [90] 张越月.充电桩迎接“两年考”代表委员就“规划”“快充”“换电”提出建议[N].国家电网报,2022-03-07(3).
- ZHANG Yueyue. Charging pile to meet the “two-year examination” on behalf of the members of the “planning”, “fast charge” and “power change” put forward suggestions [N]. State Grid News, 2022-03-07(3).
- [91] TURNER J M. The matter of a clean energy future[J]. Science, 2022, 376(6600):1361. DOI: 10.1126/science.add5094.
- [92] 郭霁莹.电力央企高管提出加快新型电网建设 智能电网概念股持续走强[N].第一财经日报,2024-06-18(A09).
- GUO Jiyang. Senior executives of central power enterprises proposed to speed up the construction of new power grids and smart grid concept stocks continued to strengthen [N]. China Business News, 2024-06-18(A09).
- [93] 戴心仪,袁兴有,胡玉财.燃油汽车与新能源汽车对比分析[J].汽车维修与保养,2024(6):96-98. DOI: 10.13825/j.cnki.motorchina.2024.06.031.
- DAI Xinyi, YUAN Xingyou, HU Yucai. Comparative analysis of fuel vehicles and new energy vehicles [J]. For Repair & Maintenance, 2024(6):96-98. DOI: 10.13825/j.cnki.motorchina.2024.06.031.
- [94] 丁波,郁舒兰.智慧交通产品设计中的物流信息交互优化研究[J].物流科技,2024,47(6):58-61. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2024.06.016.
- DING Bo, YU Shulan. Research on optimization of logistics information interaction in intelligent transportation product design [J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(6):58-61. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2024.06.016.
- [95] 魏岚.动力电池驱动新能源汽车持续向前[N].新能源汽车报,2024-04-01(10).
- WEI Lan. Power batteries drive new energy vehicles to continue to move forward [N]. Green Car Magazine, 2024-04-01(10).
- [96] 应祺煜.探讨新能源汽车电池类型现状及发展趋势[J].时代汽车,2024(5):101-103.
- YING Qiyu. Discussion about the current situation and development trend of new energy vehicle battery types [J]. Auto Time, 2024(5):101-103.
- [97] 李钰.新能源汽车动力电池应用现状及发展趋势探析[J].内燃机与配件,2024(12):132-134. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2024.12.042.
- LI Yu. Analysis of application status and development trends of power batteries in new energy vehicles [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024(12):132-134. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2024.12.042.
- [98] 薛媛媛,陈清晨.新能源汽车电池类型现状及发展趋势研究[J].时代汽车,2023(19):106-108. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2023.19.035.
- XUE Yuanyuan, CHEN Qingchen. Research on the status quo and development trend of battery types of new energy vehicles [J]. Auto Time, 2023(19):106-108. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2023.19.035.
- [99] 兰波,张庞军.浅谈中国新能源汽车的高质量发展[J].汽车工业研究,2023(4):45-48.
- LAN Bo, ZHANG Pangjun. On the high-quality development of new energy vehicles in China [J]. Auto Industry Research, 2023(4):45-48.
- [100] GÜR T M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage [J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(10):2696-2767. DOI: 10.1039/c8ee01419a.
- [101] CHU S, CUI Y, LIU N. The path towards sustainable energy [J]. Nature Materials, 2017, 16(1):16-22. DOI: 10.1038/nmat4834.
- [102] AGER J W, LAPKIN A A. Chemical storage of renewable energy [J]. Science, 2018, 360(6390):707-708. DOI: 10.1126/science.aat7918.
- [103] ZANTYE M S, ARORA A, FARUQUE HASAN M M. Renewable-integrated flexible carbon capture: a synergistic path forward to clean energy future [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(7):3986-4008. DOI: 10.1039/d0ee03946b.
- [104] LEVIN T, BISTLINE J, SIOSHANSI R, et al. Energy storage solutions to decarbonize electricity through enhanced capacity expansion modelling [J]. Nature Energy, 2023, 8(11):1199-1208. DOI: 10.1038/s41560-023-01340-6.
- [105] 贾传坤,王庆.高能量密度液流电池的研究进展[J].储能科学与技术,2015,4(5):467-475. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.05.003.
- JIA Chuankun, WANG Qing. The development of high energy density redox flow batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(5):467-475. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.05.003.
- [106] 袁治章,刘宗浩,李先锋.液流电池储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(9):2944-2958. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0295.
- YUAN Zhizhang, LIU Zonghao, LI Xianfeng. Research progress of flow battery technologies [J]. Energy Storage

- Science and Technology, 2022, 11(9): 2944-2958. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0295.
- [107] ZHANG L Y, FENG R Z, WANG W, et al. Emerging chemistries and molecular designs for flow batteries[J]. Nature Reviews Chemistry, 2022, 6(8): 524-543. DOI: 10.1038/s41570-022-00394-6.
- [108] THALLER Lawrence H. Electrically rechargeable redox flow cell: US, 3996064[P]. 1976-12-7.
- [109] 房茂霖, 张英, 乔琳, 等. 铁铬液流电池技术的研究进展[J]. 储能科学与工程, 2022, 11(5): 1358-1367. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0512.
- FANG Maolin, ZHANG Ying, QIAO Lin, et al. Research progress of iron-chromium flow batteries technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1358-1367. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0512.
- [110] WANG S L, XU Z Y, WU X L, et al. Analyses and optimization of electrolyte concentration on the electrochemical performance of iron-chromium flow battery [J]. Applied Energy, 2020, 271: 115252. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115252.
- [111] SKYLLAS-KAZACOS M, RYCHCIK M, ROBINS R G, et al. New all-vanadium redox flow cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1986, 133(5): 1057-1058. DOI: 10.1149/1.2108706.
- [112] XIA L, LONG T, LI W Y, et al. Highly stable vanadium redox-flow battery assisted by redox-mediated catalysis [J]. Small, 2020, 16(38): 2003321. DOI: 10.1002/smll.202003321.
- [113] LONG T, LONG Y, DING M, et al. Large scale preparation of 20 cm × 20 cm graphene modified carbon felt for high performance vanadium redox flow battery [J]. Nano Research, 2021, 14(10): 3538-3544. DOI: 10.1007/s12274-021-3564-z.
- [114] JIAO M L, LIU T, CHEN C J, et al. Holey three-dimensional wood-based electrode for vanadium flow batteries[J]. Energy Storage Materials, 2020, 27: 327-332. DOI: 10.1016/j.ensm.2020.02.008.
- [115] YE J Y, ZHAO X L, MA Y L, et al. Hybrid membranes dispersed with superhydrophilic TiO₂ nanotubes toward ultra-stable and high-performance vanadium redox flow batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(22): 1904041. DOI: 10.1002/aenm.201904041.
- [116] ULAGANATHAN M, ARAVINDAN V, YAN Q Y, et al. Recent advancements in all-vanadium redox flow batteries [J]. Advanced Materials Interfaces, 2016, 3(1): 1500309. DOI: 10.1002/admi.201500309.
- [117] VISWANATHAN V, CRAWFORD A, STEPHENSON D, et al. Cost and performance model for redox flow batteries [J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 1040-1051. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.023.
- [118] CRAWFORD A, VISWANATHAN V, STEPHENSON D, et al. Comparative analysis for various redox flow batteries chemistries using a cost performance model [J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 388-399. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.05.066.
- [119] LIM H S, LACKNER A M, KNECHTLI R C. Zinc-bromine secondary battery [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1977, 124(8): 1154-1157. DOI: 10.1149/1.2133517.
- [120] XU Z C, FAN Q, LI Y, et al. Review of zinc dendrite formation in zinc bromine redox flow battery [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109838. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109838.
- [121] ADAMS G B. Electrically rechargeable battery: US, 4180623A[P]. 1979-12-5.
- [122] WANG G X, ZOU H T, XU Z Z, et al. Unlocking the solubility limit of ferrocyanide for high energy density redox flow batteries [J]. Materials Today Energy, 2022, 28: 101061. DOI: 10.1016/j.mtener.2022.101061.
- [123] CHENG J, ZHANG L, YANG Y S, et al. Preliminary study of single flow zinc-nickel battery [J]. Electrochemistry Communications, 2007, 9(11): 2639-2642. DOI: 10.1016/j.elecom.2007.08.016.
- [124] CHENG Y H, ZHANG H M, LAI Q Z, et al. Performance gains in single flow zinc-nickel batteries through novel cell configuration [J]. Electrochimica Acta, 2013, 105: 618-621. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.05.024.
- [125] KLAUS S, CAI Y, LOUIE M W, et al. Effects of Fe electrolyte impurities on Ni(OH)₂/NiOOH structure and oxygen evolution activity [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119(13): 7243-7254. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b00105.
- [126] LI B, NIE Z M, VIJAYAKUMAR M, et al. Ambipolar zinc-polyiodide electrolyte for a high-energy density aqueous redox flow battery [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6303. DOI: 10.1038/ncomms7303.
- [127] XIE C X, LIU Y, LU W J, et al. Highly stable zinc-iodine single flow batteries with super high energy density for stationary energy storage [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(6): 1834-1839. DOI: 10.1039/c8ee02825g.
- [128] YANG J, SONG Y X, LIU Q H, et al. High-capacity zinc-iodine flow batteries enabled by a polymer-polyiodide complex cathode [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(29): 16093-16098. DOI: 10.1039/d1ta03905a.
- [129] XIE C X, LI T Y, DENG C Z, et al. A highly reversible neutral zinc/manganese battery for stationary energy storage [J]. Energy & Environmental Science,

- 2020, 13(1): 135-143. DOI: 10.1039/c9ee03702k.
- [130] ULAGANATHAN M, SURESH S, MARIYAPPAN K, et al. New zinc-vanadium (Zn-V) hybrid redox flow battery: high-voltage and energy-efficient advanced energy storage system [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(6): 6053-6060. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b06194.
- [131] ZHI L P, LI T Y, LIU X Q, et al. Functional complexed zincate ions enable dendrite-free long cycle alkaline zinc-based flow batteries [J]. Nano Energy, 2022, 102: 107697. DOI: 10.1016/j.nanoen. 2022. 107697.
- [132] LU W J, LI T Y, YUAN C G, et al. Advanced porous composite membrane with ability to regulate zinc deposition enables dendrite-free and high-areal capacity zinc-based flow battery [J]. Energy Storage Materials, 2022, 47: 415-423. DOI: 10.1016/j.ensm. 2022.02.034.
- [133] REMICK R J, ANG P G P. Electrically rechargeable anionically active reduction-oxidation electrically storagesupply system: US, 4485154[P]. 1984-11-27.
- [134] WEI X L, XIA G G, KIRBY B, et al. An aqueous redox flow battery based on neutral alkali metal ferri/ferrocyanide and polysulfide electrolytes [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 163(1): A5150-A5153. DOI: 10.1149/2.0221601jes.
- [135] LONG Y, XU Z Z, WANG G X, et al. A neutral polysulfide/ferricyanide redox flow battery [J]. iScience, 2021, 24(10): 103157. DOI: 10.1016/j.isci.2021.103157.
- [136] LI Z J, WENG G M, ZOU Q L, et al. A high-energy and low-cost polysulfide/iodide redox flow battery [J]. Nano Energy, 2016, 30: 283-292. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.09.043.
- [137] LI Z J, LU Y C. Polysulfide-based redox flow batteries with long life and low levelized cost enabled by charge-reinforced ion-selective membranes [J]. Nature Energy, 2021, 6(5): 517-528. DOI: 10.1038/s41560-021-00804-x.
- [138] HUSKINSON B, MARSHAK M P, SUH C, et al. A metal-free organic-inorganic aqueous flow battery [J]. Nature, 2014, 505(7482): 195-198. DOI: 10.1038/nature12909.
- [139] SÁNCHEZ-DÍEZ E, VENTOSA E, GUARNIERI M, et al. Redox flow batteries: status and perspective towards sustainable stationary energy storage [J]. Journal of Power Sources, 2021, 481: 228804.
- [140] XIE M M, ZHU X B, LI D Q, et al. Spent asphalt-derived mesoporous carbon for high-performance Li/Na/K-ion storage [J]. Journal of Power Sources, 2021, 514: 230593. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230593.
- [141] XIE M M, LI D Q, HE X, et al. Nitrogen-doped meso-macroporous carbon from waste asphalt as high-performance anode materials for alkali-ion batteries [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35: e00535. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00535.
- [142] 丁美, 付宏渊, 谢明明, 等. 一种基于废旧沥青的离子电池负极材料的制备方法: 中国, ZL202110770459X [P]. 2023-04-14.
- DING Mei, FU Hongyuan, XIE Mingming, et al. The invention related with a preparation method of ion battery negative electrode material based on waste asphalt: China, ZL202110770459X [P]. 2023-04-14.
- [143] 丁美, 谢明明, 贾传坤. 改性废旧沥青基氮掺杂介孔碳材料及其制备方法与应用: 中国, CN114604849A [P]. 2022-06-10.
- DING Mei, XIE Mingming, JIA Chuankun. Modified waste asphalt based nitrogen doped mesoporous carbon material, preparation method and application: China, CN114604849A [P]. 2022-06-10.
- [144] LI D Q, HE X, FU H, et al. Promoting the systematic utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) through waste asphalt-derived carbon in batteries applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 153055. DOI: 10.1016/j.cej.2024.153055.
- [145] XU Z Z, XU H, HU Z Y, et al. Carbon felt decorated with carbon derived from spent asphalt as a low-cost and high-performance electrode for vanadium redox flow batteries [J]. ChemNanoMat, 2022, 8(4): 202200027-1-202200027-8. DOI: 10.1002/cnma. 202200027.
- [146] 贾传坤, 丁美, 徐志钊. 一种液流电池用改性电极及其制备方法和液流电池: 中国, CN113258081A [P]. 2021-08-13.
- JIA Chuankun, DING Mei, XU Zhizhao. The invention relates to a modified electrode for a flow battery, a preparation method and a flow battery: China, CN113258081A [P]. 2021-08-13.
- [147] 贾传坤, 高阳. 废旧道路沥青混合料油石分离装置: 中国, CN215712813U [P]. 2022-02-01.
- JIA Chuankun, GAO Yang. Waste road asphalt mixture oil stone separation device: China, CN215712813U [P]. 2022-02-01.
- [148] 贾传坤, 李丹青, 丁美, 等. 废旧道路沥青混合料油石分离方法: 中国, CN113786669B [P]. 2023.02.17.
- JIA Chuankun, LI Danqing, DING Mei, et al. Oil-stone separation method for waste asphalt mixture materials: China, CN113786669B [P]. 2023.02.17.

(责任编辑:彭三军;校对:赵冰)