

基于煤氢协同与柴油动力的露天矿卡综合排放性对比

刘少权^{1,2},王海军¹,史翊翔²

(1.中国煤炭科工集团 煤炭科学研究总院有限公司,北京 100013;2.清华大学 能源与动力工程系,北京 100084)

摘要:矿卡运输是露天煤矿的关键生产系统,随着绿色低碳和清洁环保要求的提高,能源转化和矿卡动力系统运行是露天煤矿大气污染物和温室气体排放的主要来源之一,其已成为研究热点。为研究露天矿卡能源与动力方案综合排放性,以某露天煤矿及其运输系统作为研究对象,对能源转化和矿卡动力2个子系统设计了3种基于煤氢协同的技术方案及另外1种传统技术路线的对比方案,确定研究范围和边界条件,建立研究模型和数据清单,以10 a为周期对运输 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{km}$ 的土石方或煤炭的燃料周期过程中的大气污染物和温室气体排放进行定量分析和对比。结果表明方案2采用绿氢动力的综合排放性最好,方案1和3可将排放从矿卡动力转移到能源转化环节,有利于采取集中有效措施进行减排,方案1的减排重点为脱硫和除尘,方案3和方案4的减排重点为 CO_2 捕集、封存和利用,方案4矿卡柴油动力系统的大气污染物CO和 $\text{HC}+\text{NO}_x$ 排放量大,减排技术难度大,有必要开展矿卡新型清洁高效动力系统研究。

关键词:煤氢协同;煤矿运输;矿用自卸车;综合排放性;氢能动力

中图分类号:TQ53;TK114 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2023)11-0161-06

Contrastive research on comprehensive emission of haul truck based on coal-hydrogen synergy and diesel engine

LIU Shaoquan^{1,2}, WANG Haijun¹, SHI Yixiang²

(1. China Institute of Coal Science, China Coal Technology & Engineering Group, Beijing 100013, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Haul truck transportation is a key production system in opencast coal mine. With the increasing requirements for green, low-carbon, clean and environmental protection, energy conversion and haul truck power, as one of the main sources of atmospheric pollutants and greenhouse gas emissions from opencast coal mine, have become research hotspots. In order to research the comprehensive emission of energy and power scheme of haul truck, a certain open-pit coal mine and its transportation system were taken as the research object. Three technical schemes based on coal-hydrogen synergy and another comparison plan of traditional technology routes were designed for the two subsystems of energy conversion and haul truck power. The research scope and boundary conditions were determined, and the research models and data lists were established. Quantitative analysis and comparative study were conducted on the atmospheric pollutants and greenhouse gas emissions during the fuel cycle of transporting $1 \text{ m}^3 \cdot \text{km}$ of earthwork or coal over a period of 10 a. The result shows that Scheme 2 uses green hydrogen power to achieve the best comprehensive emission performance. Schemes 1 and 3 can transfer emissions from haul truck power to energy conversion, which is conducive to adopting centralized and effective measures for emission reduction. The emission reduction focus of Scheme 1 is on desulfurization and dust removal, while the emission reduction focus of Scheme 3 and Scheme 4 is on CO_2 capture, storage, and utilization. Scheme 4 has a large emission of atmospheric pollutants including CO and $\text{HC}+\text{NO}_x$ from the diesel power system of the haul truck, making emission reduction technology difficult. It is necessary to research on a new clean and efficient power system of the haul truck.

Key words: coal-hydrogen synergy; coal mine transportation system; haul truck; comprehensive emission; hydrogen power

收稿日期:2023-02-20;责任编辑:张鑫 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.H23022001

基金项目:中国煤科集团重点资助项目(2020-2-TD-ZD004)

作者简介:刘少权(1986—),男,河南平顶山人,高级工程师,博士。E-mail:newbalance2004@163.com

通讯作者:史翊翔(1982—),男,内蒙古自治区鄂尔多斯人,教授,博士。E-mail:shyx@tsinghua.edu.cn

引用格式:刘少权,王海军,史翊翔.基于煤氢协同与柴油动力的露天矿卡综合排放性对比[J].洁净煤技术,2023,29(11):161-166.

LIU Shaoquan, WANG Haijun, SHI Yixiang. Contrastive research on comprehensive emission of haul truck based on coal-hydrogen synergy and Diesel engine[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 161-166.



移动阅读

0 引言

运输系统是露天煤矿生产系统的重要组成部分,主要作用是完成煤炭或剥离土石方的运输和排卸作业,非公路矿用自卸车(简称矿卡)是其主力设备。在各煤炭采矿大国中,矿卡运输量已占采剥运输总量的80%以上,能源消耗约占矿山总能耗的40%~60%^[1]。目前矿卡的主要动力形式是大功率高速柴油机,由于露天煤矿开采和运输强度的不断提高,且柴油机运行工况复杂、时间长,CO、HC、NO_x、颗粒物(PM)等大气污染物,以及CO₂等温室气体的排放问题极其严重,极大危害矿区和周围环境,是目前露天煤矿行业面临的普遍共性难题和制约因素之一^[2]。

近年来,在双碳战略目标和新发展理念下,氢能源与燃料电池等相关技术装备和产业发展迅速^[3]。氢能动力车辆不仅能够实现使用终端大气污染物零排放,采用绿氢能源后,与传统柴油动力车辆相比,还能够减少全生命周期温室气体排放50%以上,环境保护和社会效益显著^[4]。在煤炭采矿行业,煤炭与氢能协同发展、矿区可再生能源发电与制氢储能相结合以及研发和推广应用氢能动力矿卡已成为建设绿色矿山的重要途径^[5-7]。国家能源集团、英美资源集团等煤炭采矿企业联合矿卡和氢燃料电池系统制造商已陆续开始氢能动力矿卡研究和试验工作。

由于可简化从制氢到用氢的复杂环节,在露天煤矿应用氢能动力矿卡具有先天优势条件,但目前系统性的研究工作开展较少。笔者对露天矿卡能源与动力方案综合排放性进行定量分析和对比,可为氢能源与燃料电池技术在露天矿卡的应用研究工作起铺垫作用,还可为煤炭与氢能协同发展、煤炭洁净高效利用等提供决策依据和理论支持,为双碳战略目标和绿色矿山建设下的能源转型提供参考。

1 研究目标和研究对象

1.1 研究目标定义

露天矿卡能效和成本核算通常以 $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ 为基本单位(1 m^3 煤炭或剥离土石方运输1 km距离),因此在能源与动力方案综合排放性研究时统一使用 $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ 作为基本单位。废水和废渣主要产生于能源转化环节,废水处理和循环利用技术、废渣再利用率不断提高,在定义研究目标时视废水和废渣为近零排放。

露天矿卡属于矿用特种设备,批量不大,受统计数据资料所限,能源转化设备和矿卡动力子系统所用材料全寿命周期对排放性的影响主要以10 a为周期,研究露天煤矿运输 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{km}$ 的煤炭或剥离土石方,从一次能源转化为燃料到矿卡动力子系统终端使用的燃料周期过程中各大气污染物和CO₂综合排放性定量分析和对比研究。

1.2 研究对象

以某露天煤矿及其运输系统作为研究对象,该煤矿位于我国重点能源化工基地,煤炭生产能力1 000万t/a,煤质为烟煤,平均剥采比 $5 \text{ m}^3/\text{t}$,平均提升高度200 m,平均单程运输距离3 km,平均爬坡度6%,折合使用116台120吨级矿卡(额定载重108 000 kg)进行煤炭或剥离土石方运输排卸作业,矿卡动力子系统功率需求约800 kW。该煤矿坑口附近有大型煤化工工厂,已建成400万t合成柴油和100万t氢气(H₂)的产能规模。该能源化工基地周边具有丰富的风能和太阳能资源,已建成风力发电和太阳能光伏发电场,正在规划建设可再生能源电解水制氢储能项目。研究对象符合煤氢协同的应用场景条件。

2 技术方案设计

在露天煤矿,常用移动式加注车辆为矿卡补给燃料,运输距离较短,从能源转化到矿卡动力的过程得到简化,因此笔者主要对能源和动力2个子系统进行研究。2个子系统分别采用不同的技术路线,将2个子系统的不同技术路线排列组合,即可得到露天矿卡能源与动力的不同技术方案。

在能源转化子系统中,我国当前煤化工行业发展较成熟,无论是煤化工制氢气还是制柴油的技术路线,均已达规模化、产业化水平,电解水制氢气的技术路线产业化规模尚小,还处于初级阶段,且所需电能主要来自煤炭火力发电,仍产生大气污染物和温室气体^[8],如果可再生能源发电与制氢储能融合发展,在技术经济和环保等诸多方面有强大竞争力^[9-11]。在矿卡动力方面,目前柴油动力是主要技术路线,氢能动力方案中,动力装置为氢燃料电池和小容量大功率型辅助动力蓄电池组成的混合动力系统,其中氢燃料电池提供主要的动力需求,蓄电池具有削峰填谷作用,目前已有样机且正在进行工业应用试验^[12]。

设计综合排放性研究对比方案时,常规上能源转化子系统采用石油炼制柴油的技术路线,矿卡动力子系统采用柴油动力的技术路线。实际上在能源

转化环节煤化工制柴油标杆水平的大气污染物排放数据参考《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020年修订版)》(环办大气函〔2020〕340号)中炼油和石油化工业绩分级指标的A级要求,相比石油炼制柴油的大气污染物排放更少,且煤化工制成的合成柴油的污染物成分含量更低,燃烧排放更加清洁环保^[13]。

因此选择综合排放性更好的煤化工制柴油和矿卡柴油动力技术路线作为综合排放性研究的对比方案。所选择研究对象具有各种能源转化条件和矿卡动力燃料需求,为研究工作提供良好基础。

根据现有的能源转化和矿卡动力的技术条件,共设计出3种氢能动力技术方案和1种柴油动力对比方案,分别见表1中的方案1~3和方案4。

表1 露天矿卡能源与动力方案

Table 1 Energy and power scheme in opencast coal mine transportation system

方案	能源转化子系统	矿卡动力子系统
1	煤化工制氢气	氢能动力
2	可再生能源发电+电解水制氢气	氢能动力
3	煤炭火力发电+电解水制氢气	氢能动力
4	煤化工制柴油	柴油动力

3 研究模型和数据清单的建立

3.1 研究模型

建立研究模型主要目的是确定研究范围,确定前文所述4种技术方案中的含能物质材料和能量流动路线和系统边界,然后收集、挖掘和分析处理清单数据,为实现研究目标提供前提条件^[14]。方案1~4研究模型如图1所示。

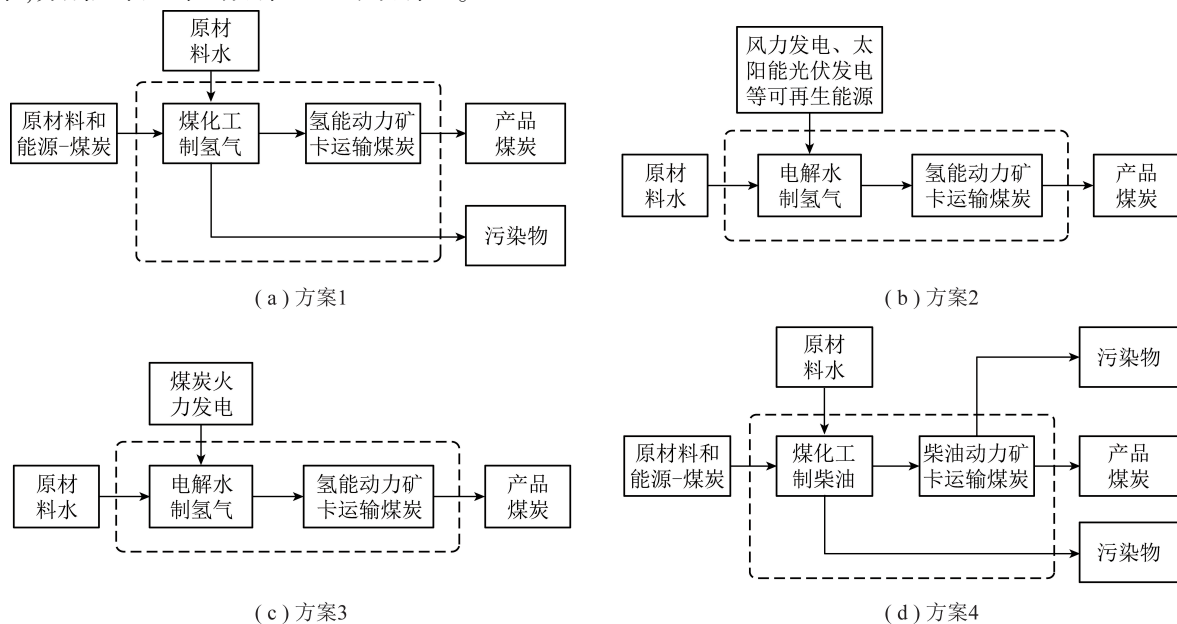


图1 方案1~4研究模型

Fig.1 Research model for scheme 1-4

研究模型建立的说明、假设和简化如下:

1) 研究周期设定为10 a,通常矿卡设备的设计寿命为10 a(在良好的操作使用、维护保养条件下更长),煤化工设备的设计寿命为20 a,可再生能源发电设备的设计寿命为20 a,各种基础设施的设计寿命则更长,且矿卡全生命周期过程中整车及各子系统/分总成的材料周期排放统计数据较少,因此暂不考虑在内。研究模型包括从含能物质材料开采,到转化,再到矿卡动力子系统终端利用的所有过程以及各种大气污染物和温室气体的排放。

2) 在研究模型中,含能物质材料包括煤炭、水等,大气污染物包括CO、HC、NO_x、SO₂、PM等有毒有害物质和CO₂等温室气体。

3) 所有环节产生的大气污染物和温室气体,除符合法律法规和标准规范要求的达标排放外,其余直接排放到环境中。

3.2 数据清单

建立数据清单是研究工作的核心环节,通过全寿命周期清单数据的收集、挖掘和分析处理,可以获得技术方案中能源转化和矿卡动力2个子系统过程中的排放数据,以及2组数据累加后的综合数据。如何获取准确可靠和实时实地数据,建立科学合理的数据清单,是研究工作的重点和难点。在收集数据时遵循以下原则:

1) 考虑技术的时空有效性和科学合理的前瞻性,研究对应时间(2019—2022年)和研究对象(我

国重点能源化工基地及其露天煤矿)。

2) 以我国工业、煤炭、能源、电力、采矿、化工、环保等行业数据为主,以国外数据为辅,包括但不限于官方统计数据、现行的标准规范、文献资料等。

3) 对数据的取舍、处理上兼顾获取数据的难易程度和数据对结果的影响程度。

能源转化子系统清单数据主要来源和依据为

1) 在能源转化子系统中的大气污染物排放,我国已制定较完善的法律法规和标准规范。在煤化工制氢气、柴油等环节,假定CO作为副产品进行回收利用,则污染物只有NO_x、SO₂、PM等,大气污染物排放数据按照《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020年修订版)》(环办大气函[2020]340号)中炼油和石油化工业绩分级指标的A级要求,以及GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》。在煤炭火力发电环节,排放的大气污染物主要有SO₂、NO_x、PM等,参考GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》、GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》和GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》。在可再生能源发电和电解水制氢气等环节,大气污染物排放近零。

2) 在矿卡动力子系统的大气污染物排放,矿卡柴油动力系统大气污染物排放遵守GB 20891—2014《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第3、4阶段)》^[15],其中第3阶段标准于2015年10月1日开始实施,额定净功率560 kW以下非道路移动机械用柴油机于2022年12月1日开始实施第4阶段标准,也就是说,本研究中的矿卡采用的800 kW柴油动力系统仍在执行第3阶段标准,排气污染物主要包括CO、HC、NO_x、PM等有毒有害物质,遵守达标排放。矿卡氢能动力系统生成物只有水,大气污染物排放近零。

3) 在矿卡柴油动力系统中,大功率高速柴油机燃料消耗率约200 g/kWh^[16],根据该露天煤矿运输系统统计,柴油消耗数据为125 g/(m³·km),因此1 m³·km运输量的CO₂排放量可根据柴油主要成分十六烷烃(C₁₆H₃₄)计算:
$$\frac{12 \times 16}{12 \times 16 + 34 \times 1} \times \frac{12 + 2 \times 16}{12} \times$$

125 = 389 g/(m³·km)。

4) 矿卡氢能动力系统中,高纯度氢气和空气中的氧气在氢燃料电池堆中发生电化学反应,实际最高效率可达65%以上^[17],考虑变工况运行和辅助系统消耗等因素,氢燃料电池系统综合效率接近50%,燃料消耗率约50 g/kWh(以H₂计),远高于柴油动力系统的卡诺循环效率,生成物只有水,可视为

近零排放。柴油动力系统匹配的矿卡传动系统为交流-直流-交流-机械传动型式,氢能动力系统匹配的矿卡传动系统为直流-交流-机械传动型式,传动路线短,效率更高,氢能动力系统中与辅助动力蓄电池,能够在矿卡下坡时电力制动进行能量回收^[18],因此采用氢能动力系统的矿卡综合效率高,可计算出氢气消耗量为25 g/(m³·km)。

5) 假定未使用碳捕集、封存和利用技术(CCUS处于示范工程阶段,因经济性尚差,暂未得到大规模推广应用)^[19-20],根据文献[10],煤化工制氢气的碳排放水平约19 kg/kg(以H₂计),则煤化工制氢气环节,1 m³·km运输量的CO₂排放量为:19×25 = 475 g/(m³·km)。

6) 在煤炭火力发电环节,碳排放水平按生态环境部发布的2021年度电网排放因子581 g/kWh(以CO₂计),度电煤耗水平按国家能源局2021年度全国电力工业统计数据305 g/kWh。制氢电耗数据根据文献[9],按5 kWh/m³计算。氢气密度取89 g/m³,则1 m³·km运输量的CO₂排放量为:(25/89)×5×581 = 816 g/(m³·km)。

7) 在煤化工制柴油环节,CO₂排放强度根据参考文献[21-22]统计为3.48 g/g,1 m³·km运输量的CO₂排放量为:3.48×125 = 435 g/(m³·km)。

根据每种方案的2个子系统的大气污染物和温室气体排放系数,考虑技术迭代更新,计算得到每个子系统的排放清单,分别见表2、3,再汇总每种方案的2个子系统的大气污染物和温室气体排放清单,得到排放总清单见表4。

表2 能源转化子系统排放系数

Table 2 Emission list-energy conversion subsystem

类型	气体	排放系数			
		方案1	方案2	方案3	方案4
大气污染物	SO ₂	4.15	0	0.38	0.11
	CO	0	0	0	0
	HC+NO _x	0	0	0.72	0.26
	PM	0.45	0	0.19	0.02
温室气体	CO ₂	475.00	0	816.00	435.00

4 对比研究及优化措施

通过对露天矿卡能源与动力方案数据清单的定量分析和对比,可获得从能源转化到矿卡动力2个子系统过程中大气污染物和温室气体的综合排放情况,识别出各方案的环境影响,找到减少环境污染的解决途径。

表3 矿卡动力子系统排放系数

Table 3 Emission list-haul truck power subsystem

类型	气体	排放系数			
		方案1	方案2	方案3	方案4
大气污染物	SO ₂	0	0	0	0
	CO	0	0	0	2.18
	HC+NO _x	0	0	0	3.98
	PM	0	0	0	0.12
温室气体	CO ₂	0	0	0	389.00

表4 排放总清单

Table 4 Total emission list

类型	气体	排放系数			
		1	2	3	4
大气污染物	SO ₂	4.15	0	0.38	0.11
	CO	0	0	0	2.18
	HC+NO _x	0	0	0.72	4.24
	PM	0.45	0	0.19	0.14
温室气体	CO ₂	475.00	0	816.00	824.00

1) 根据排放总清单,在不考虑材料周期排放的情况下,方案2最绿色环保,在能源转化和矿卡动力2个子系统过程中几乎不排放大气污染物和温室气体,从综合排放性角度可视为露天矿卡能源与动力的最佳解决方案,绿氢动力矿卡是露天煤矿运输系统技术装备的发展趋势。

2) 方案1和3的矿卡氢能动力使用终端无大气污染物和温室气体排放,主要排放集中在能源转化环节,有条件采取措施对排放进行集中处理,在各种技术成熟时,减排力度更大。

3) 对排放清单中大气污染物进行分析:方案1的主要问题是煤化工制氢气过程中SO₂排放量大,比方案3和方案4大1个数量级,PM排放量较大,是方案3和方案4的2~3倍,因此方案1应做好煤气化过程中脱硫和除尘措施;方案4中矿卡柴油动力系统的CO和HC+NO_x排放量大,比方案3大1个数量级,即使强制执行非道路移动机械用柴油机国四排放标准,大气污染物CO和HC+NO_x排放量有所下降,与矿卡氢能动力相比综合排放性也无优势。

4) 对排放清单中温室气体CO₂进行分析:方案3和4的CO₂总排放量接近,方案1的CO₂总排放量最小,比方案3和4减少排放40%以上,主要原因是煤化工制氢气环节和矿卡氢能动力系统均比较高效;方案3中,电解水制氢气的效率低,需消耗更多电能和煤炭,导致CO₂总排放量居高;方案4中,矿卡柴油动力使用终端的CO₂排放量大,煤化工制柴

油过程中CO₂排放量亦大。由于方案1和3的CO₂排放集中于煤化工制氢气环节,加快CCUS技术攻关和推广应用的效果最显著。

5 结论与展望

以某露天煤矿及其运输系统作为对象,研究露天矿卡能源与动力方案综合排放性,对包括能源转化和矿卡动力2个子系统的燃料周期过程中的大气污染物和温室气体排放进行定量分析和对比研究,并给出优化措施建议如下:

1) 4种技术方案中,在不考虑材料周期排放的情况下,方案2的综合排放性最好,方案4的综合排放性最差,且减排技术难度大,因此有必要研究氢能动力等新型的矿用移动设备动力系统方案。

2) 方案1和方案3的矿卡终端使用氢能动力,无大气污染物和温室气体排放,与方案4相比,实际上只是将排放转移到能源转化环节,在各技术成熟时,可采取更有效的措施进行减排。

3) 方案3的减排重点在于CO₂捕集、封存和利用,方案1除需进行CO₂捕集、封存和利用外,更要注重脱硫和除尘。

4) 在研究露天矿卡能源与动力方案综合排放性时,因数据较少,未考虑材料全寿命周期排放的影响,后续有必要继续开展相关领域的研究工作。

参考文献 (References):

- [1] 赵波等. 交流传动电动轮自卸车结构与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013: 1-12.
- [2] 谢贤平, 李怀宇. 露天矿用汽车尾气排放对大气环境的影响研究[J]. 中国矿业, 1995(2): 59-64.
XIE Xianping, LI Huaiyu. A study on the impact of exhaust emissions from open-pit mining vehicles on the atmospheric environment [J]. China Mining, 1995 (2): 59-64.
- [3] 谭琦璐. “双碳”背景下我国能源转型发展的主要技术形式与生态环境影响[J]. 中国能源, 2022,44(2): 13-22.
TAN Qilu. Fuel Consumption and emission inventory of typical construction equipments in China [J]. Energy of China, 2022, 44(2): 13-22.
- [4] 哈宁宁. 电动汽车全生命周期碳排放评估及对环境的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [5] 刘臻. 煤基氢能关键技术和发展路线研究[J]. 神华科技, 2018,16(1): 64-69.
LIU Zhen. Study on the critical technologies and development route of coal-based hydrogen energy [J]. Shen-hua Science and Technology, 2018,16(1): 64-69.
- [6] 闫俊荣. 煤基氢能:在氢能发展初期将发挥“兜底”作用[J]. 中国石油和化工, 2022(8): 73.
- [7] 张玉卓. 新常态下煤基清洁能源发展战略研究[C]//第十届

- 全国采矿学术会议论文集:专题五:煤炭加工与环保.鄂尔多斯:[s.n], 2015: 82-88.
- [8] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究[J]. 当代石油石化, 2023,31(1): 19-25.
CHEN Xin. Comparative study on life-cycle carbon emissions of typical hydrogen production processes [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2023,31(1): 19-25.
- [9] 米树华. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2019.
- [10] 张永伟. 中国氢能产业发展报告[R]. 北京: 中国电动汽车百人会氢能中心, 2020.
- [11] 张永伟. 中国氢能产业发展报告[R]. 北京: 中国电动汽车百人会氢能中心, 2022.
- [12] 冯彦彪, 邵俊恺, 杨珏, 等. 矿用自卸车新能源技术研究现状与展望[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-7[2023-07-13]. DOI:10.13199/j.tknki.est.2021-0999.
FENG Yanbiao, SHAO Junkai, YANG Jue, et al. Research of energy-efficient mining truck: current status and perspectives [J/OL]. Coal Science and Technology: 1-7[2023-07-13]. DOI:10.13199/j.tknki.est.2021-0999.
- [13] 刘海峰, 崔雁清, 董芳, 等. 直接/间接煤制油对重型柴油机燃烧和排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2019,25(4): 289-296.
LIU Haifeng, CUI Yangqing, DONG Fang, et al. Effects of direct or indirect coal liquefaction fuels on combustion and emissions of heavy-duty diesel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019,25(4): 289-296.
- [14] 朱昊, 余卓平. 基于全生命周期评价的燃料电池汽车氢能路径分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017,45(S1): 138-143,151.
ZHU Hao, YU Zhuoping. Life Cycle Assessment of hydrogen pathways for fuel cell vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017,45(S1): 138-143,151.
- [15] 张潇文, 王晶. 对非道路移动机械用柴油机排放标准的探究[J]. 中国标准化, 2017(2): 234.
ZHANG Xiaowen, WANG Jing. For the road mobile mechanical diesel engine emission standard [J]. China Standardization, 2017(2): 234.
- [16] 李东玲, 吴焯, 周昱, 等. 我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究[J]. 环境科学, 2012,33(2): 518-524.
LI Dongling, WU Ye, ZHOU Yu, et al. Fuel consumption and emission inventory of typical construction equipments in China [J]. Environmental Science, 2012,33(2): 518-524.
- [17] 崔胜民. 燃料电池与燃料电池电动汽车[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 191-193.
- [18] 孙逢春. 燃料电池电动汽车设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 225-235.
- [19] 李家全, 刘兰翠, 李小裕, 等. 中国煤炭制氢成本及碳足迹研究[J]. 中国能源, 2021,43(1): 51-54.
LI Jiaquan, LIU Lancui, LI Xiaoyu, et al. Study on the cost and carbon footprint of hydrogen production from coal in China [J]. Energy of China, 2021,43(1): 51-54.
- [20] 张贤, 许毛, 徐冬, 等. 中国煤制氢 CCUS 技术改造的碳足迹评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(12): 1-11.
ZHANG Xian, XU Mao, XU Dong, et al. Carbon footprint assessment of coal-to-hydrogen technology combined with CCUS in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(12): 1-11.
- [21] 李智, 刘涛, 张志伟, 等. 煤化工低碳技术及其与新能源耦合发展的研究进展[J]. 中国煤炭, 2022(8): 48.
LI Zhi, LIU Tao, ZHANG Zhiwei, et al. Research progress on low-carbon technology of coal chemical industry and its coupling development with new energy [J]. China Coal, 2022(8): 48.
- [22] 叶超. 典型煤化工及 CCS 技术的生命周期影响评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.