

煤直接液化技术研究进展

余英飞*, 朱新月, 王文博

(国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 新疆 哈密 839000)

摘要:综述了煤直接液化基本原理, 主要包括煤热解反应、氢原子传递、加氢稳定反应。还重点探讨了煤种筛选标准、催化剂与溶剂及国内外典型技术等研究进展, 旨在聚焦高效催化剂研发、溶剂循环利用及工艺优化, 以推动技术突破与产业化应用。

关键词:煤直接液化技术; 基本原理; 煤种筛选; 催化剂; 溶剂

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)08-0078-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.015

Research progress of coal direct liquefaction technology

SHE Ying-fei*, ZHU Xin-yue, WANG Wen-bo

(China Energy Group Xinjiang Hami Energy & Chemical Co., Ltd., Hami 839000, China)

Abstract: This paper elaborates on the fundamentals of direct coal liquefaction, including coal pyrolysis, hydrogen atom transfer and hydro-stabilization reactions. Recent advances in coal selection criteria, catalysts, solvents and mainstream technologies at home and abroad are also reviewed. This study targets the development of high-performance catalysts, solvent recycling and process optimization to advance technological innovation and industrialization.

Key words: direct coal liquefaction; fundamental principles; coal selection; catalysts; solvents

随着全球变暖问题的日益突出, 煤炭直接燃烧的比例逐步下降, 而更清洁、更高效的煤炭利用方式将获得主流认可^[1]。煤的利用主要包括直接燃烧和能源转化。直接燃烧主要用于工业锅炉、火力发电和住宅供暖, 而能源转化则是生产更清洁的气体或液体燃料以及高附加值的化学品^[2]。其中, 煤直接液化(DCL)技术是实现煤炭资源清洁高效利用的重要途径之一。

我国是世界第一能源生产和消费大国, 拥有丰富的煤炭资源。然而, 在天然气与石油利用方面, 对外依存度高达 40% 和 70%, 严重威胁到我国能源安全和经济发展^[3]。据数据统计, 天然气剩余技术可采储量约 8.4 万亿 m³, 占全球储量的 4.5%; 石油剩余技术可采储量约 38.5 亿 t, 占全球储量的 1.5%; 煤炭剩余技术可采储量约 2 185.7 亿 t, 占全球储量的 13.4%。我国煤炭资源分布广泛, 主要集中在山西、新疆、陕西、内蒙古和贵州等地区, 具有价格低廉、清洁高效等应用前景。“2030 年前实现碳达峰”、“2060 年前实现碳中和”目标的提出, 为我国未来发展指明正确方向, 以消耗煤炭为主的能源结构将向更加清洁的能源消耗结构, 产品附加值更大、污染物排放更少的方向发展^[4]。煤直接液化作为我国能源转型的关键技术, 在多个关键环节面临严峻考验。然而, 通过对煤直接液化技术的持续创新与

工业化实践, 有望在提高效率与降低成本方面取得更大突破, 为我国能源安全和清洁高效可持续发展提供坚实基础。

其中, 主要对煤直接液化基本原理、煤种、催化剂和供氢溶剂研究等方面进行了综述。旨在探索煤炭资源的高值化利用途径, 期望通过煤直接液化技术生产出更加清洁高效、低成本的石油, 以缓解我国石油资源短缺、平衡能源结构和保障国家能源安全。

1 煤直接液化基本原理

作为煤炭清洁转化领域的关键技术, 煤直接液化技术旨在实现煤炭向高品质液体燃料的转化, 即将氢碳原子比约为 0.8 的煤转变为氢碳原子比约为 2.0 的液体燃料。在煤液化过程中, 当反应温度升至 300~600℃ 时, 煤大分子发生热解, 煤有机质大分子结构单元中键能较弱的桥键, 在这一温度区间率先发生断裂产生大量游离自由基^[5]。氢气在催化剂的活化下, 分子内的 H—H 键发生断裂, 产生高活性的氢原子, 同时溶剂分子中的特定官能团被激发具有提供活性氢的作用。这些活性氢与不稳定的煤自由基迅速发生加氢反应, 生成稳定的小分子产物, 即实现煤大分子向小分子油的转化。然而, 在实际过程中存在明显的竞争机制^[6]。若煤大分子产生的自由基碎片未能及时捕获活性氢, 这些自由基碎

收稿日期: 2025-10-15; 修回日期: 2026-06-07

作者简介: 余英飞(1997-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为煤直接液化, 通讯联系人, 210112118@sust.edu.cn。

片则更倾向于发生缩聚反应。这种缩聚反应会生成分子质量更大的缩聚产物,降低液体燃料的产率。此外,进行深度加氢时,煤中 S、N、O 等杂原子发生脱离反应,包括加氢脱氧、加氢脱氮、加氢脱硫等反应,以促进杂原子从煤分子结构中脱离^[7]。该反应一般需经过煤的热解、氢传递和加氢稳定反应等过程,通过对热解产生的煤自由基碎片进行加氢,以形成小分子的稳定加氢产物。

1.1 热解反应

热解反应受温度调控,而受其他因素影响较小^[8]。当温度处于 230~320℃ 时,煤结构中键能较弱的桥键率先断裂形成自由基碎片;温度升至 450~460℃,键能较高部分亦开始断裂,持续产生自由基碎片。研究表明,300~500℃ 时,煤发生裂解,芳环与桥键断裂生成大量自由基;超过 550℃,则倾向于缩聚反应并结焦;超过 600℃,以缩聚反应为主^[5]。

1.2 氢传递

热解反应产生的自由基碎片具有高反应活性与低稳定性,易与活性氢结合,生成低分子质量沥青烯、油、气态物质等初始加氢产物。反应过程中,供氢溶剂为反应提供活性氢,促进热解和离析煤中氢原子并传递给煤自由基;催化剂加速气相氢向溶剂、溶剂氢向煤的传递。由于供氢体性质不同,氢传递路径存在差异性和竞争性。以铁系催化剂为例,反应前期,稳定自由基的活性氢主要来源于供氢溶剂和煤;而反应后期,氢气成为活性氢的主要来源,氢气消耗量急剧上升^[9]。

明晰氢传递作用机理,对降低氢消耗、提高煤转化率和提质液化油品意义重大。对此,研究者开展了诸多相关研究,由于煤种、溶剂、催化剂及工艺条件的不同,煤液化时氢的传递路径与机理截然不同。因此,在不同条件下确定供氢体活化方法,以及活性氢与煤自由基碎片的结合方式,将成为未来研究的重要方向。

1.3 加氢反应

加氢反应是自由基碎片与活性氢原子结合并稳定的过程。催化剂反应活性不同,加氢反应深度不同。若催化剂活性低,则会导致要求的反应温度增高,超出适宜范围,或供氢能力不足,自由基碎片无法顺利与活性氢结合,彼此间发生缩聚反应,形成大分子质量的物质,即结焦现象。

2 煤直接液化煤种

煤种品质和液化性能是筛选液化用煤的重要依

据。通常来说,挥发分含量高、H/C 原子比大、氧/碳比(O/C)低、惰质组含量少的煤种,变质程度低,液化性能更好,具有催化剂投量、残渣量少和油产率高等特点^[10]。在液化工艺中包括制粉环节,在挑选原料煤时,易磨或者中等难磨程度的煤种会更具优势,应当予以优先考虑。

然而,煤的不均一性和结构复杂性,导致众多研究难以在煤的组成、物理性质与煤液化特性之间建立精准的对应关系。例如,低变质程度的煤具有较好的液化性能以及易于液化等优点,但具有氧含量高特点,导致液化过程中水产率和耗氢量增加,间接降低了油产率。

3 煤直接液化催化剂研究

催化剂为氢气解离的氢自由基提供活性位点。考虑催化剂与体系中的大分子煤及自由基碎片充分接触,才能更好地发挥催化作用,当选择催化剂时,要求具备较高的反应活性和键的断裂选择性同时,还要求具有较大的比表面积和较好的分散性^[12]。多年来,国内围绕催化剂结构和性能展开诸多研究,而考虑到现场工艺的复杂性,以及催化剂制造成本相对较高等实际问题,只有铁系催化剂实现工业化应用^[11]。

3.1 铁系催化剂

铁系催化剂主要以含铁的矿物、废弃物、合成物质为代表,具有来源广泛、价格低廉等显著优点。该催化剂与减底沥青残渣一同处理,无需进行回收,极大地简化了工艺流程。常见的催化剂活性相是磁黄铁矿 $\text{Fe}(1-x)\text{S}$,一般 x 取值范围在 0~0.223 之间,相较于 S 含量,Fe 含量相对不足。这是由于部分 Fe^{2+} 被 Fe^{3+} 所取代,为维持电价平衡, Fe^{2+} 原本占据的结构位置出现了部分空位,引发结构缺陷,晶体缺陷正是化学反应的活性中心。例如,高分散性纳米级铁系催化剂,凭借尺寸效应显著增加了活性组分原子与反应体系的接触面积,减少催化剂用量和残渣排量,对优化液化工艺、推动技术进步具有重要意义^[12]。

3.2 贵金属催化剂

钴(Co)、钼(Mo)、镍(Ni)等贵金属具有良好的催化性能。以钼基催化剂为例,具有高的反应活性、硫化物转变温度相对较低等特点,常温下可转变为具有催化活性的硫化态。尽管金属催化剂在催化活性方面表现优异,但高昂的价格却成为实际应用的一大障碍。这是因为采用贵金属作为催化剂,必然导致成本增加。为缓解这一压力,可尝试通过催化

剂回收等方式对贵金属进行回收。但工业生产中,难以将参与反应的催化剂从残渣中分离,若液化残渣处理不当,贵金属将严重污染环境。

3.3 酸催化剂

酸催化剂具有促进加氢裂化、开环等重要作用。例如, ZnCl_2 、 SnCl_2 等酸性金属卤化物作为催化剂能有效促进煤中有机大分子键断裂。低温时,催化剂具有良好的催化活性,但生产过程中易腐蚀反应设备与物料管道。酸根离子抑制催化剂晶粒生长,使活性相均匀分散。研究表明,酸根离子改变催化剂表面性质和活性相转变过程^[13]。然而,在高温、高压等复杂条件下,易导致现有催化剂在线分析表征技术难以揭示酸性离子的作用机制,相关认知仍处于较浅层次。

3.4 复合催化剂

非贵金属催化剂受制于自身结构与反应活性,研究重点逐渐转向复合催化剂体系。谢晶等^[14]分别在 Fe 基催化剂制备阶段引入 Mo 元素,制备成 5 种以 Mo 修饰的钼铁复合催化剂。结果表明,经 Mo 修饰的复合催化剂反应活性明显提高。其中,浸渍引入 Mo 未改变铁氧化物结构,而倾向富集于催化剂表面以提高与反应物的接触可能性。基于多金属协同催化机制,在铁系矿物中引入微量 Ni 元素,通过精细化处理与干燥工艺,制得的多金属复合催化剂在促进煤转化与提升油品产率方面表现优异,催化效率显著高于传统的超细高分散铁系催化剂^[15]。

目前,制备含贵金属元素的复合型催化剂,需重视催化剂回收问题,主要回收方法包括液化中间产物循环法和化学法处理。复合型催化剂打破了单一催化体系的效能瓶颈,但当前回收技术存在明显短板,成为制约技术发展的关键问题。

4 煤直接液化溶剂研究

供氢溶剂为液化反应提供活性氢,常见的供氢体包括四氢萘、萘、蒽、菲、煤焦油等^[16]。在液化原料工段,供氢溶剂通过预混捏实现溶剂与粉煤接触,借助煤粉溶胀与分散,提升煤的反应活性,建立有利的动力学与热力学条件。反应过程中,溶剂充当供氢体并参与氢传递,促进煤大分子内强化学键断裂,稳定煤热解产生的自由基^[17]。

4.1 溶剂的物理作用

在油煤浆输送环节,溶剂黏度与油煤浆浓度相关,黏度过低导致煤粉沉降分离,黏度过高引发结焦堵塞。溶剂不同对煤的溶解能力不同。研究表明,

四氢萘对煤具有良好的溶胀分散作用,十氢萘次之,而烷烃油几乎无溶解能力。这是因为煤的化学结构基本单元由多环芳烃构成,根据相似相溶原理,芳烃类溶剂结构与煤相似,在溶解过程中更具优势^[18]。此外,溶剂对氢气的溶解作用不容忽视,有效促进煤、催化剂与氢气接触,促进煤液化反应。

4.2 溶剂的化学作用

溶剂不仅作为供氢来源,还具有传递煤中富氢部分及氢气中的氢原子的作用^[19]。另一方面,溶剂帮助煤大分子结构内的 Caryl—Calkyl 键发生断裂,促进煤液化反应进程。此外,作为氢气与煤自由基传递氢的载体,加快氢气在溶剂中的溶解和氢传递进程。研究表明,溶剂的氢传递性能与供氢活性本质上取决于自身的饱和度及芳香环的数量^[20]。以 4,5-二氢茈为例,是现阶段供氢能力较出色的溶剂。在反应过程中,4,5-二氢茈会被煤自由基持续夺取氢原子生成茈。随后,茈又极易加氢重新形成 4,5-二氢茈,继续起供氢作用。这是因为四氢萘分子包含 4 个活性氢,四氢萘先失去 α -H,形成的 α -四氢萘自由基作为溶剂发生氢转移的重要媒介。

4.3 溶剂反应机制

氢自由基传递主要通过“夺氢反应”实现,受自由基稳定性与溶剂供氢性能影响。氢自由基传递路径主要包括:一是氢气中的氢原子直接与煤分子发生反应;二是溶剂所含氢原子直接参与煤的加氢过程;三是氢气通过溶剂的“氢穿梭”效应间接地传递至煤。溶剂反应机制中,自由基机制、氢传递机制、氢解机制等多种机制相互交织,共同影响反应产物生成与分布。

4.3.1 自由基机制

煤自由基碎片结构不稳定,极易与溶剂或氢气提供的活性氢发生反应^[21]。由于供氢体存在差异,自由基反应的氢传递路径也尽不相同。研究表明,煤液化反应过程具有显著的阶段性特征。第一阶段,煤分子在高温下热解,产物主要为沥青烯与前沥青烯,并伴随气体组分及大分子油类缩聚物的生成。第二阶段,部分沥青烯和前沥青烯通过加氢反应转变为油品,而部分自由基会自发缩聚形成大分子聚合物。在加氢裂化与催化剂的共同作用下,这些大分子物质裂化转变成分子质量更小的油品。

溶剂为稳定自由基碎片提供主要氢来源。当稠环芳烃分子中芳环经加氢至饱和状态,其 α 位的 C—H 键解离能要低于直链烷烃的 C—H 键解离能,首先发生断裂产生氢。在反应进程中,若未添加催

化剂,氢原子主要从溶剂传递至煤,80%的氢消耗都来自溶剂;若添加催化剂,近 50%的氢消耗来自溶剂,这是因为催化剂促进氢气活化,产生足量的活性氢。此时,来自氢气和溶剂的氢消耗量基本相当。

4.3.2 氢解机制

溶剂含酚类、喹啉类等极性物质,促进煤大分子中共价键断裂。以酚类物质为例,酚羟基上的氢原子与醚键里的氧原子形成氢键,使 C—O 醚键的解离键能降低,造成醚键型桥键断裂。在吡啶和四氢喹啉分子中,与 N 原子相连的氢原子与煤中醚键 O 原子形成氢键,增加 C—O 键断裂速度,使煤中大分子结构发生裂解。溶剂促进煤大分子结构中部分强 C—C 键发生断裂。通过提供活性氢使化学键断裂所需的能量与热解时所需能量相比要低得多,使煤中原本较强的共价键也获得断裂条件^[22]。

4.3.3 氢传递机制

溶剂通过间接加氢促进煤液化反应。研究发现,相较于供氢溶剂四氢萘,将非供氢溶剂苊与四氢萘混合用于煤直接液化,油品转化率更高^[23]。这是因为非供氢溶剂虽不能直接作用于反应,但与供氢溶剂存在协同作用。例如,将苊、荧蒹、蒽等无供氢能力的溶剂添加至具备供氢能力的四氢荧蒹溶剂中,反应转化率明显高于四氢荧蒹溶剂。将十氢萘、菲、苊以及荧蒹逐一与四氢萘混合,在未添加催化剂时,无论在氢气还是氮气环境下采用混合溶剂参与反应,产物收率均高于四氢萘。研究发现,菲、苊和荧蒹等具有从供氢性溶剂获取氢原子的能力,转变为更具加氢活性的 9,10-二氢菲、4,5-二氢苊以及 1,2,3,10b-四氢荧蒹。在非/四氢萘、苊/四氢萘以及荧蒹/四氢萘混合溶剂中,并未发现菲、苊和荧蒹的衍生物^[24]。综上所述,供氢溶剂首先会经历脱氢环节,再发生加氢反应,通过循环往复机制实现对氢原子的传递。

5 国内外典型煤液化技术

21 世纪,基于我国煤炭在能源结构中的主导地位,煤直接液化、煤科院 CDCL 液化等工艺逐渐出现,而国外研究则基本处于停滞。我国“百万吨级煤直接液化项目”融合国内外先进工艺,开启了煤炭工业化新篇。近年来,煤制油工艺主要包括德国 IGOR⁺、日本 NEDOL、美国 H.Coal 与 HTI、煤直接液化工艺^[24]。

5.1 德国 IGOR⁺工艺

基于德国老 IG 工艺,该工艺将反应压力降至

30 MPa,供氢能力得到增强^[25]。该技术以赤泥为液化反应催化剂,采用商业化 Ni—Mo—Al₂O₃ 催化剂精制液化油,较于德国老 IG 工艺具有显著优势:一是煤浆固体质量分数超 50%,处理能力强,反应器空速达 0.5 h⁻¹;二是将循环溶剂加氢、液化油提质与煤直接液化整合于同一高压系统,减少物料升降温、升降压能耗;三是循环溶剂采用中油与催化加氢重油混合油,无固体成分、煤浆黏度降低、供氢能力提升。

5.2 日本 NEDOL 工艺

较德国 IGOR⁺ 工艺、NEDOL 工艺反应条件温和,压力降至 17~19 MPa,一般用于液化次烟煤与低质烟煤^[26]。液化产物经高低温分离器,重质组分被送入常减压蒸馏塔分离。部分中质油与全部重质油至溶剂加氢反应器,分离出的重质组分循环作为溶剂。配煤浆所用溶剂是将减压蒸馏后的中质、重质组分混合,经单独加氢反应分离制得,溶剂供氢性强^[27]。显著优势在于:一是以合成硫化铁或天然硫铁矿为低成本催化剂;二是借鉴美国 EDS 工艺,对循环溶剂单独加氢提效;三是通过减压蒸馏实现固液分离;四是适用于次烟煤及低阶烟煤。

5.3 美国 HTI 工艺

该工艺在两段催化液化法和 H.Coal 工艺基础上得以发展,采用悬浮床反应器和铁基催化剂^[28]。工艺中,悬浮床反应器产物经闪蒸分离,重质组分进沸腾床反应器。产物经高温分离器分离,轻质组分送入固定床加氢反应器,加氢产物经闪蒸分离,获得的重质组分与高温分离器重质组分进入常压蒸馏塔。显著优势在于:一是反应条件温和,反应温度 420~450℃,反应压力 17 MPa;二是采用全返混沸腾床反应器;三是采用铁系胶状高活性催化剂;四是高温分离器后设置加氢固定床反应器,对液化油进行加氢精制;五是固液分离采用临界溶剂萃取,从液化残渣中最大限度回收重质油。

5.4 煤直接液化工艺

2008 年 12 月 31 日,煤直接液化技术完成从实验室小试、中试到百万吨级工业示范装置的全流程生产,成为全球首创。在反应部分,油煤浆和氢气在高温、高压及催化剂作用下反应生成液化油。在常减压分馏部分,将生产的液化油与未反应的煤和催化剂等固体颗粒分离,分离后进入加氢稳定装置,约含 50% 固体颗粒的油渣通过减压塔底拔出界区至沥青成型装置处理^[29]。这一里程碑式成果不仅验证了煤直接液化技术从实验室研发走向工业化应用

的可行性,更标志着全球煤基液体燃料产业化进程进入全新阶段。

6 结论与展望

煤直接液化工艺作为煤炭清洁高效利用的关键技术,在实现工业化应用和高效发展的进程中仍面临着诸多挑战,主要体现在设备运行、原料筹备、溶剂优化和催化剂研发等多个方面。

(1)煤液化反应条件控制难度较高,通常在高温、高压环境下进行,不仅对设备材质提出极高要求,还大幅增加设备投资成本,且在运行过程中的能耗成本居高不下。

(2)在煤种选择上,不同煤种的特性差异显著影响液化产率,无烟煤难以液化,其他煤种虽可液化但程度不同,要筛选出理想煤种,必须综合考量煤的挥发分、碳氢比、氧含量等多项复杂指标,这无疑增加了前期原料筹备的难度与复杂性。

(3)现阶段,虽认识到溶剂的重要性,但如何进一步优化溶剂性能,提高溶剂对煤的溶解能力、增强其与催化剂的协同作用、降低溶剂损耗与回收成本等方面,仍需开展大量深入研究。

(4)在催化剂研究方面,虽研究出的铁系催化剂具有较好的使用性能,但距离成为工业应用的理想催化剂仍有一定差距,突破现有局限,开发出活性高、选择性强、寿命长且廉价易得的催化剂,仍是当前科研攻关的重点方向。

参考文献

- [1] Zhang Y, Li H, Ramirez Reina T, *et al.* Coal chemistry industry: From production of liquid fuels to fine chemicals to carbon materials [J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(23): 17754–17764.
- [2] Keboletse K P, Ntuli F, Oladijo O P. Influence of coal properties on coal conversion processes-coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: A review [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(5): 817–843.
- [3] 金红光, 郭烈锦, 宣益民, 等. “双碳”目标下能源转化与利用科学问题 [J]. *中国科学基金*, 2025, 39(3): 474–488.
- [4] Lyu Q, Chai Z. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 541–548.
- [5] 曹景沛, 姚乃瑜, 庞新博, 等. 煤热解研究进展及其发展历程 [J]. *化工进展*, 2024, 43(7): 3620–3636.
- [6] Hao H, Chang T, Cui L, *et al.* Theoretical study on the mechanism of hydrogen donation and transfer for hydrogen-donor solvents during direct coal liquefaction [J]. *Catalysts*, 2018, 8(12): 648.
- [7] Wang Z C, Duan P G, Liu X J, *et al.* Hydrotreating the low-boiling-point fraction of biocrude in hydrogen donor solvents for production of trace-sulfur liquid fuel [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(24): 10210–10223.
- [8] 黄艺宸, 赵云鹏, 吴法鹏, 等. 基于煤炭地下气化的大颗粒块煤热解研究进展 [J]. *现代化工*, 2025, 45(2): 32–36.
- [9] 胡发亭, 王学云, 毛学锋, 等. 煤直接液化制油技术研究现状及展望 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(1): 99–109.
- [10] Meyer N J A, Strydom C A, Bunt J R, *et al.* Direct liquefaction of South African vitrinite-and inertinite-rich coal fines [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(10): 12272–12289.
- [11] Li Y, Ma F, Su X, *et al.* Ultra-large-scale synthesis of Fe_3O_4 nanoparticles and their application for direct coal liquefaction [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(16): 6718–6722.
- [12] Song W, Liu P, Chen X, *et al.* Research progress of catalysts for direct coal liquefaction [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, 100: 481–497.
- [13] 虞琦, 张勇, 王唤唤, 等. 酸根离子对精煤电化学脱硫及煤质的影响 [J]. *煤炭转化*, 2021, 44(6): 67–74.
- [14] 谢品, 舒歌平, 杨葛灵, 等. Mo 修饰的钼铁复合催化剂及其煤直接液化催化性能 [J]. *化工学报*, 2021, 72(9): 4675–4684.
- [15] 王勇, 李文博, 史士东. 一种煤直接液化复合催化剂的研究 [J]. *煤炭转化*, 2011, 34(3): 47–105.
- [16] Niu M, Pan L, Ji P, *et al.* A preliminary study on the co-hydrogenation process of coal tar and bio-oil [J]. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2024, 137(3): 1667–1682.
- [17] Liu H, Zhang R, Zheng X, *et al.* Hydrogen-donating behavior and hydrogen-shuttling mechanism of liquefaction solvents under Fe- and Ni-based catalysts [J]. *Fuel*, 2024, 368: 131586.
- [18] 赵云鹏, 吴法鹏, 司兴刚, 等. 低阶煤催化加氢转化研究进展 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1067–1079.
- [19] Li L, Hou Y, Wu W, *et al.* Behaviors of tetralin and 9, 10-dihydroanthracene as hydrogen donor solvents in the hydrogenolysis of coal-related model compounds [J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 191: 202–210.
- [20] 刘海云. 供氢溶剂对神华煤直接液化行为影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [21] Li W, Li W Y, Wang X B, *et al.* Regulation of radicals by hydrogen-donor solvent in direct coal liquefaction [J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2022, 16(12): 1689–1699.
- [22] Liu M, Yang J, Li Y, *et al.* Radical reactions and two-step kinetics of sub-bituminous coal liquefaction in various solvents [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(3): 2090–2098.
- [23] Niu B, Jin L, Li Y, *et al.* Interaction between hydrogen-donor and nondonor solvents in direct liquefaction of bulianta coal [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(12): 10260–10267.
- [24] 李贞, 王俊章, 申丽明, 等. 煤制油工艺及煤制油残渣综合利用综述 [J]. *环境工程*, 2021, 39(5): 135–149.
- [25] 张德祥, 刘瑞民, 高晋生. 煤炭直接加氢液化技术开发的几点思考 [J]. *石油学报: 石油加工*, 2011, 27(3): 329–335.
- [26] 蔺华林, 张德祥, 高晋生. 煤加氢液化制取芳烃研究进展 [J]. *煤炭转化*, 2006, (2): 92–98.
- [27] 李海军, 张小彬, 王兴宝, 等. 煤直接液化溶剂研究述评 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3791–3804.
- [28] 许建文, 王继元, 堵文斌, 等. 煤直接液化技术进展 [J]. *化工进展*, 2012, 31(S1): 119–123.
- [29] 李克健, 吴秀章, 舒歌平. 煤直接液化技术在中国的发展 [J]. *洁净煤技术*, 2014, 20(2): 39–43. ■