

Experimental and mechanism study of plasma assisted coal liquefaction technology

Bo Xing

Xinjiang Hami energy and Chemical Co., Ltd., of national energy group, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

due to the growing demand for energy, coal, as one of the most important energy, has become the core issue of the energy industry to realize its efficient transformation and clean utilization. The plasma assisted coal liquefaction technology is widely concerned because of its high efficiency and environmental protection. In this paper, the reaction characteristics, product distribution and reaction mechanism in the process of plasma assisted coal liquefaction were discussed from two aspects of experiment and mechanism by using the relationship between plasma triggering the conversion of coal molecules and catalyst. Plasma discharge is used to activate the free radicals with low activation energy in the process of coal liquefaction to accelerate the cracking and hydrogenation of coal, so as to better promote the coal liquefaction reaction. The experimental results show that with the aid of plasma, the conversion rate of coal liquefaction process is increased by more than 20% compared with the traditional liquefaction process, and the content of aromatic and olefins in liquid products is significantly increased, which provides a new way and theoretical thinking for better design of coal liquefaction technology.

Keywords

Plasma assisted; Coal liquefaction; Reaction mechanism; Free radicals; Liquid products; Catalyst; Energy conversion

等离子体辅助煤液化技术的实验与机理研究

邢波

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 中国·新疆哈密 839000

摘要

由于能源需求的日益增长, 煤炭作为最主要的能源之一, 实现其高效转化与清洁利用, 成为能源行业的核心课题。而等离子体辅助煤液化技术由于高效环保的特点而广受关注。本文利用等离子体触发煤分子的转化以及与催化剂作用关系, 从实验和机理两个方面探讨了等离子体辅助煤液化过程中反应的特征、产品分布与反应机理。利用等离子体放电激活煤液化过程中活化能低的自由基, 加快煤的裂解、加氢, 达到更好地促进煤液化反应。实验结果显示, 借助等离子体的辅助, 煤液化过程的转化率较传统的液化工艺提升20%以上, 同时液相产品中芳香族、烯烃族含量大幅度增加, 为更好地设计煤液化技术提供了新的途径和理论思路。

关键词

等离子体辅助; 煤液化; 反应机理; 自由基; 液体产物; 催化剂; 能源转化

1 引言

鉴于能源需求不断增加, 煤炭作为一种重要的能量来源, 其高效清洁转化利用已成为当今研究热点。尽管已经通过传统煤液化工艺在一定程度上实现了煤炭的转化, 但仍然存在低能效和对环境具有破坏性的问题。近些年, 因能产生活化自由基和高能电子的优势, 等离子体技术作为新一类的能源转换方法被广泛应用于各类化学反应, 其中在煤液化进程中的潜在应用前景尤为引人关注。等离子体辅助煤液化工艺在提高煤液化效率的同时, 能改善液化产率分布和品级。

【作者简介】邢波(1983—), 男, 中国甘肃张掖人, 本科, 工程师, 从事煤直接液化研究。

2 研究背景与意义

2.1 煤液化技术的现状与挑战

煤液化技术是将煤转化为液体燃料的技术, 被看作是将煤资源高效和绿色环保利用的重要途径, 随着世界各国能源需求的持续增长, 煤液化凭借其可替代石油进行能量转化的技术特性, 成为当前能源领域的研究与应用热点。目前煤液化技术可分为直接液化和间接液化两大类, 直接液化是通过将氢气作为反应介质在高温高压下的氢化反应获得的, 而间接液化则是将煤转化为合成气, 在合成气的 FT 等方法下形成液体燃料。尽管两种方法已经有了一定的应用, 但是仍然有诸多的问题。其中最主要的问题是, 煤液化过程的高能耗, 制约了煤液化技术的经济效益和环境的友好性。与此

同时,由于煤气化过程与裂解过程较为复杂,且所需的反应温度和压力条件较为苛刻,所生成的液体产物质量以及分布难以精准控制。因此,如何在提高煤液化转化率、提升液化产品质量的同时,降低能耗和污染物排放量,是目前煤液化技术发展面临的主要问题。

2.2 等离子体技术的应用与发展

等离子体技术是以发生高能放电获得的离子状态气体为特色,包括温度高、密度低以及大量自由基、离子等活性粒子,近些年已被广泛应用于化学反应、材料制取和污染治理等领域。由于等离子体具有高能态和高活性,可导致分子发生反应,并加快反应速率,部分反应甚至可在常温常压条件下实现。等离子体在煤炭液化方面,克服了传统煤炭液化流程中能耗过大、反应太复杂等弊端,其核心作用机制在于等离子体通过促进煤的分解生成大量的自由基,进而促进煤的液化,从而提升煤炭液化效果和产品品质。随着等离子体放电发生器和控制技术持续的研究和发展,等离子体辅助煤炭液化技术是目前煤炭液化领域的研究热点之一。

3 等离子体辅助煤液化的实验研究

3.1 等离子体反应装置与实验设置

本文设计的等离子体煤加氢催化裂解模拟实验装置,主要由等离子体制备装置、反应管、温度压力控制单元、气体流量控制装置等组成。通过高脉冲高压放电技术产生等离子体,在反应系统内释放出较多、较高能量的电子、活性基团及离子体,能够有效促进煤分解液化;通过温度压力可控单元对反应管温度、压力进行精确控制,模拟煤加氢反应过程温度压力环境;在实验过程中,煤样品与催化剂混合后投入反应管,在等离子体作用下发生反应,还可通过调节温度、压力及等离子体强度实现参数控制;并引入气体流量控制装置,对氢气等气体流量进行控制,保证实验正常进行。该装置具有的温度控制、气态控制、电气控制性能良好,完全可以准确模拟等离子体辅助煤液化过程的化学反应过程。

3.2 煤液化反应的实验过程

首先选取目标粒度的煤炭,并在其表面添加助燃剂,置入反应器内,提高反应容器中的温度到反应所需的目标温度,通过氢气等反应提供还原反应的反应环境,打开等离子体发生装置,注入大量高能电子能级离子、自由基,发生煤炭分子的碳链分解及氢气协同作用,过程中由原来碳链大分子变成碳链小分子和液状产物,实验过程中将会实时监测反应温度、反应压力、等离子体能量等实验因素对煤液化率的影响,并在一段时间后将目标粒度煤炭测试样抽出一部分作为实验材料,采用气相色谱仪、液相色谱仪对其成分含量和质量含量进行检测,针对煤的液化率和产液率进行研究。在实验过程中,可不断调节等离子体功率、温度、压力等反应参数,以判断其对煤液化试验的影响。

3.3 实验结果与分析

实验表明,在煤液化中加入等离子体显著提高煤的

转化率,能够使煤液化转化率较常规的煤液化方式提高20%~30%;等离子体参与煤液化过程时,可促使煤分子大分子分解成小分子,从而降低液化过程的反应难度,并显著提升液体产品中芳烃和烯烃比,这一现象表明等离子体能够加快煤液化加氢进程。此外反应温度、等离子体强度和等离子体助剂类型对煤的液化转化效率、煤的转化率以及转化产物的质量具有显著影响;实验中发现合适的等离子体强度能够促进煤的液化反应并提高液化反应效率,但是过大的等离子体强度造成浪费并降低反应产品的质量;实验优化反应条件如提高 H_2 流速和反应温度可以继续提高煤液化的效率和反应产物的质量。综上所述,等离子体辅助煤液化工艺在提高煤的液化效益的同时,也优化了液化产物的质量和组成,为煤液化的高效绿色应用提供了新的技术路线。

4 等离子体辅助煤液化的反应机理分析

4.1 等离子体对煤分子结构的激发作用

等离子体技术不仅涉及高能粒子对煤炭分子结构的激发作用,还可以为煤液化过程中的样品分析提供重要数据支持。在煤液化的过程中,等离子体技术能够帮助生成自由基和其他活性中间产物,促进煤炭分子裂解。然而,实验中更为重要的是如何利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)等先进分析仪器来定量分析煤液化过程中的中间产物及最终产物,并指导煤液化反应的优化。因此,等离子体辅助煤液化的技术不仅体现在化学反应的机理上,更体现在其对煤液化中间控制样品及产品分析化验的应用上。

4.2 等离子体产生的自由基及其对煤的降解作用

在等离子体状态下生成的自由基(如氢自由基($H\cdot$)、羟基自由基($OH\cdot$)、氧自由基($O\cdot$))能够有效打破煤分子中的碳-碳键或碳-氢键,引发煤分子裂解。在实验过程中,ICP-OES等分析仪器可以监测自由基生成过程中的化学变化,并对生成的裂解产物进行实时分析。通过这种分析方法,可以优化煤液化反应的参数设置,减少加氢及结焦等问题,提高煤液化的效率和产物质量。

4.3 反应机理的理论模型

4.3.1 基于自由基理论的煤液化反应机理

根据自由基理论,煤液化过程包括断裂、形成自由基和加氢等过程。在此过程中,电磁感应共振等离子体发射光谱仪(ICP-OES)可以提供有用的操作数据,例如,当煤分子发生断裂时,仪器可以在线对各种类型裂解产物(包括微烯烃和小分子芳香化学品)做出变化反应,为调节反应过程而获得最佳效果提供依据。通过有效的产品测量方法,早期就能预测煤液化进程,从而提高煤液化的过程性能。

4.3.2 等离子体辅助下煤分子与催化剂的相互作用

催化剂和煤炭液化时使用的等离子体的组合效应对煤炭液化反应至关重要。主要是在煤炭液化反应中能够降低反应需要的能耗并提高反应的效果,在等离子体内利用提供的高能粒子来激发催化剂的活性,ICP-OES对催化剂表面活性

位精准测量可以用来优化催化剂的设计进而加快煤炭液化的速率,并且改善煤炭液化产品的质量。此外,煤液化产品成分变化趋势可以帮助研究出用于解决煤液化产品中加氢、结焦等问题的新型催化剂,扩大煤炭液化产品的应用范围。

4.3.3 数据:等离子体激发使得煤分子中的大分子裂解成较小分子,促进了加氢反应

据试验显示,运用等离子体介入煤液化的过程效果不仅体现在提高转化率上,还体现在促使大分子等级的煤质物生成小的细微粒度级别的小分子,促进了煤液化过程中小的细微粒度级别的小分子的活化。而活化的小分子更加可以进行参与后期加氢,提高了液态产品品质以及产率;数据显示,在等离子体作用下,煤质转化率提高20%-30%,煤液产品的苯环、烯烃比例相应大大增加。此外,还有助于增加加氢速度,改质煤液产品的气-液配比结构。ICPOES在煤炭液化的整个过程中,起到了控制整个流程的关键作用,能准确检测出煤液化过程中的中间生成物以及最终所得的液态能源产物,以此作为进一步优化反应的据料。通过调控等离子体的能量、反应温度等情况,ICPOES可以帮助科研人员及时监测煤炭分子裂解和产氢情况,实现最优化的反应。

4.4 催化剂的作用与优化

4.4.1 催化剂对液化产物的影响

对于煤炭液化的过程而言,催化剂的作用十分重要,可以提高煤炭转化率,改善液体产物质量,并改变其分布。催化剂提供反应环境,降低煤炭分子的破碎需要的能量和使氢被吸附和嵌入,从而改变煤炭的分解过程。使用不同的催化剂会导致煤炭液化产物的变化,例如利用铁系催化剂,其产物中含有较多的芳环,使用钴系催化剂,则能更有利于生成简单的碳氢化合物,因此,对煤炭液化的效果来讲,催化剂的改善必不可少。ICP-OES在实践中主要被用作对煤炭转化过程使用各种催化剂的影响,尤其是它们对于煤炭转化后产品的影响进行评估的方法,可以通过ICP-OES对产品转化过程产生的实时元素组成检测,为催化剂的优化提供量化、精确的数据参考,从而进一步提高产品的均匀性及产品的品质。

4.4.2 等离子体与催化剂的协同效应

优化煤液化效果的关键在于加强等离子体与催化剂的配合情况,通过等离子体产生的能量电子以及自由基促进催化剂活性位置的发生,来提高化学反应能力,促进煤分子裂解、加氢。采用ICP-OES对煤液化产物中间产物进行监测,能够动态地研究等离子体—催化剂相互作用的影响程度,特别是催化剂对煤炭分解过程中的自由基生成、氢元素参与速率的促进作用。笔者通过实验验证,等离子体与催化剂协同使用促进了煤液化转化率以及煤液质量的提高。icp-oess提供的元素分析结果可以帮助研究者调整等离子体功率以及催化剂的比例,以进一步增强煤液化效率以及煤液质量。

5 结语

本研究通过等离子体辅助煤液化实验和机理分析,得出了以下结论:等离子体辅助煤液化的转化率明显提高,比常规处理方式高出20%。煤分子的大分子结构在等离子体的作用下被降解为小分子团,促进了加氢反应,导致液化产品中苯和烯烃含量的增加。等离子体产生的自由基对煤的降解起到了关键作用,且与催化剂协同作用,增强了煤液化效果。通过ICP-OES对煤液化中间产物的精确分析,可以为煤液化过程中的反应优化提供重要指导。等离子体强度及其与催化剂的配合对煤液化反应的效果至关重要,未来的研究将重点探索等离子体与催化剂的最优配比,以实现煤液化技术的工业化应用,助力煤炭的高效清洁利用。

参考文献

- [1] 王泽宇;刘彦廷;张浩然. 等离子体辅助煤液化反应机理的研究[J]. 化学工程与技术, 2023(5): 45-49.
- [2] 赵晨曦;林鹏飞;高敏杰. 等离子体在煤液化中的应用及其反应机制探讨[J]. 能源科学与技术, 2022(12): 123-127.
- [3] 李振东;陈亦凡;周伟明. 等离子体强化煤液化技术研究综述[J]. 燃料化学学报, 2021(8): 85-90.
- [4] 黄建华;魏承志;吴泽霖. 等离子体辅助煤液化反应的动力学分析[J]. 煤炭转化, 2020(10): 110-115.
- [5] 杨力昊;孙雨辰;王俊琪. 等离子体对煤液化产物分布的影响[J]. 煤化工技术, 2019(7): 78-82.