

等离子体煤气化技术研究进展

龚泽儒^{1,2}, 王晓娜², 吕俊复¹, 张 戟³

(1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东 烟台 264006;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘 要: 等离子体煤气化技术是一种能够实现煤的超洁净使用的新技术, 具有很大的潜在应用前景。介绍了等离子体煤气化的基本原理及3种典型技术: 水蒸气等离子体煤气化技术、等离子体辅助煤气化及CO₂等离子体煤气化技术, 其中水蒸气等离子体煤气化中碳转化率可达93%~94%, 比常规气化合成气浓度高十多个百分点; 等离子体辅助煤气化以用氮气、氩气等为工作气体, 实现了气化剂与工作气体的分离以及发生器和反应器的分离; CO₂等离子体煤气化技术为煤炭的清洁利用和CO₂的资源化利用提供了可借鉴的方法。同时, 笔者还论述了学科交叉产生的最新成果: 即等离子体煤气化技术在电站燃煤锅炉点火启动和降低氮氧化物方面的应用。在锅炉点火启动方面, 与常规等离子体点火技术相比, 采用等离子体煤气化技术虽然会增加成本, 但相对于燃用低挥发分煤的煤粉锅炉每年上千吨的节油量, 经济效益显著。在氮氧化物减排方面, 烟台龙源电力技术股份有限公司采用等离子体辅助煤气化技术与低NO_x燃烧技术相结合, 以达到深度降低氮氧化物的目的, 且解决了等离子体煤气化普遍存在的煤处理量少、能耗高的问题, 试验结果表明, 采用60 kW等离子体发生器即可处理5 t/h煤量, 实现了低能耗的等离子体辅助煤气化。据估算, 该技术的初投资略低于SCR脱硝技术, 而运行费用仅为SCR的一半。因此建议将基于等离子体点火的内燃技术引入等离子体煤气化技术, 可大幅提高煤处理规模、降低能耗, 与低NO_x燃烧技术相结合并实现工业化, 将会推动其在电站燃煤锅炉技术领域的快速发展, 成为一种具有很好应用前景的煤炭清洁高效利用手段。

关键词: 等离子体; 煤气化; 燃烧; 锅炉

中图分类号: TQ54

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)01-0035-06

Research on plasma gasification technology of coal

GONG Zeru^{1,2}, WANG Xiaona², LYU Junfu¹, ZHANG Ji³

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Yantai Long Yuan Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: Plasma gasification of coal is a novel technology which can make ultra-clean use of coal come true. It has great and potential application prospect. The basic principle and three typical techniques of plasma coal gasification technology are introduced, which include steam plasma coal gasification, plasma jet aid coal gasification and CO₂ plasma coal gasification. The carbon conversion of steam plasma coal gasification is 93%~94%, whose concentration of gasification syngas conventional is 10% higher than convention. Nitrogen and argon are used in plasma jet aid coal gasification, which can realize the separation of gasification agent and working gas and the separation of generator and reactor. CO₂ plasma coal gasification is proved to be an effective method for the clean utilization of coal and resource utilization of CO₂. Besides, the latest achievements of interdisciplinary research are discussed which include the application in the ignition and nitrogen oxides reduction of power plant pulverized boiler. In terms of boiler ignition: Compared with conventional plasma ignition technology, economic benefits of plasma coal gasification technology are significant which can save thousands of tons of fuel per year. In terms of nitrogen oxide reduction: The combination of plasma jet aid coal gasification and low NO_x combustion technology is adopted by Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd, in order to achieve deep reduction of nitrogen oxides and solve the problems of low coal handling ca-

收稿日期: 2018-12-06; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18120611

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604205)

作者简介: 龚泽儒(1981—), 男, 湖南双峰人, 高级工程师, 博士研究生, 从事清洁煤燃烧理论研究与技术开发。E-mail: immortal191@163.com

引用格式: 龚泽儒, 王晓娜, 吕俊复, 等. 等离子体煤气化技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 35-40.

GONG Zeru, WANG Xiaona, LYU Junfu, et al. Research on plasma gasification technology of coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 35-40.



移动阅读

capacity and high energy consumption. The test results of Longyuan show that the coal of 5 t/h could be disposed by the 60 kW plasma generator, and the low-energy plasma jet aid coal gasification could be realized. According to preliminary estimate, its initial investment is slightly less than SCR denitrification technology while its operating costs are only half of SCR. Therefore, it is suggested to introduce the internal combustion technology based on plasma ignition into the plasma coal gasification technology. In this way, the coal processing scale can be greatly increased and energy consumption can be greatly reduced. Combined the plasma gasification technology of coal with low NO_x combustion technology to industrialize, which will promote the rapid development in the field of power plant pulverized boiler. It will become a clean and efficient coal utilization method with great application prospect.

Key words: plasma; coal gasification; combustion; boiler

0 引言

能源的供求和环境的改善是我国面临的两大主要问题。我国是以煤炭为主要能源的国家,煤炭在我国能源生产与消费中占主要地位。长期以来,我国煤炭利用较粗放,对资源的浪费和环境的污染均造成一定的压力。随着我国经济的发展和人民物质水平的提高,我国能源与环境面临着更加严峻的挑战。因此,发展清洁高效的煤转化技术具有长远意义。

煤气化是洁净煤技术的重要组成部分,也是关键的煤化工能源技术之一。我国石油和天然气资源匮乏,煤炭气化制得的合成气($\text{H}_2 + \text{CO}$),既可加工成醚类、醇类和酚类等具有高附加价值的化学品,以实现“煤变油”的目标,也可替代天然气或燃料气。

近年来,各种煤气化技术在国内迅速发展,新的气化技术不断涌现,等离子体气化即为一种较新颖的煤气化技术^[1-3]。

1 等离子体煤气化技术基本原理

等离子体具有高温、高焓、富含活性粒子的特点,在烃类裂解^[4-5]、生物质气化^[6]、煤粉锅炉点火^[7]及固体废弃物处理^[8]等方面得到广泛应用。

等离子体煤气化是在氧化性电弧等离子体气氛中,煤与 H_2O 、 CO_2 和 O_2 等气化剂在一定温度和压力下进行不完全化学反应,使煤中可燃部分转化为含有 CO 、 H_2 、 CH_4 等的合成气。在煤气化过程中,煤被气化剂氧化,气化剂被还原^[9],同时通过等离子体有效提高温度以改善气化条件。以水蒸气为气化剂时,在通入水蒸气的等离子体中,含有许多非热动力学平衡的粒子和放射性物质,当粉煤加入等离子体流中,煤在高温下与活性粒子反应,反应过程复杂。但是大体上等离子体煤气化的反应阶段可分为 4 个步骤:① 当煤粒与等离子体进行热交换时,煤粒被瞬时加热;② 挥发分在一定温度下热解,并快速释放;③ 释放出的挥发分迅速气化,其速度取决

于反应器内的高温,均相、快速的热交换和物质交换;④ 半焦状煤粒通过扩散、在活性络合体上的化学吸附、产物的脱附与逆扩散进行气化^[10]。

按照等离子体的参与方式,等离子体煤气化技术可分为等离子体煤气化和等离子体炬辅助煤气化 2 种;按照气化剂的类型,又可分为水蒸气/空气等离子体煤气化、 CO_2 等离子体煤气化等。图 1 为典型的等离子气化装置。

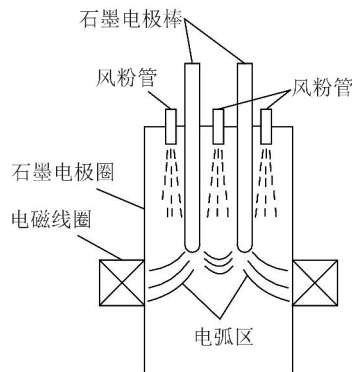


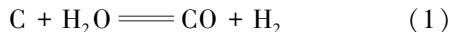
图 1 等离子体气化装置

Fig. 1 Plasma gasification equipment

1.1 水蒸气/空气等离子体煤气化技术

等离子体煤气化研究始于 20 世纪中期^[11],该技术以气化剂为工作气体进行放电,由气化剂产生的等离子体与煤粉直接作用,使之气化,通常采用水蒸气或空气作为气化剂,水蒸气居多。

与水蒸气下的高温气化类似,煤在水蒸气等离子体中的气化,气化产品气体中主要包含 CO 和 H_2 。由于气化的温度条件不通过燃烧提供,因此 CO_2 含量非常低(一般小于 1%)。水蒸气等离子体煤气化温度非常高,几乎没有 CH_4 生成,已全部转化为 CO 和 H_2 ,与此同时,煤中 90% 以上的硫(包括有机硫和无机硫)转化为 H_2S ^[10]。煤水蒸气等离子体气化中的主要反应为



气化反应能耗与原料煤含氧量及灰分有关。水蒸气等离子体煤气化中,碳转化率可达 93% ~

94%,合成气的有效成分浓度无需处理即可达 95% 以上,比常规气化合成气浓度高十多个百分点。

由于褐煤水分含量较高,完全气化的经济性始终是难题,在传统的气化技术中,有效合成气成分含量较低。采用等离子气化,则有显著的优势。采用三相电产生蒸汽等离子体进行褐煤气化试验,试验装置如图 2 所示。研究表明,碳转化率在 90.5% ~ 95%,得到的合成气中 CO 及 H₂ 的体积分数为 84.7% ~ 85.7%,煤粉中有 94.3% ~ 96.7% 的硫转化为 H₂S^[11]。此外,Kalinenko 等^[11]以动量、热量守恒为基础建立数学模型,模拟了反应温度、碳转化率及各组分浓度在反应器长度方向的变化规律,模拟结果与试验结果相吻合。模拟结果显示,气化炉的温度可达 3 000 K 左右,远高于普通的气化过程。

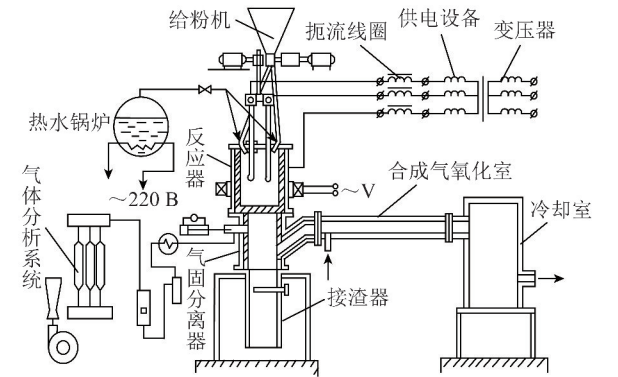


图 2 水蒸气等离子体煤气化试验装置

Fig. 2 Water vapor plasma coal gasification experimental device

氧气等离子体褐煤气化时,碳转化率可达 90%,合成气中 CO 体积分数达 60%,而 CO₂ 体积分数不高于 3%^[12]。气化效果与等离子气体的输入量有关,等离子体输入功率越大,气化过程中提供的自由基含量越高,合成气中 H₂ 和 CO 含量越高^[13-15];供煤速率和磁场电流越大,CO 含量越高,而 H₂ 含量减少;在试验条件下,合成气中 H₂ 和 CO 的体积分数含量达 75%,CO₂ 含量少于 3%。

等离子体也可由微波发生装置提供,如图 3 所示。通过微波等离子体褐煤气化试验发现,褐煤含水量为 38.12%,煤粉平均粒径 70 μm,水蒸气等离子体微波频率 2.45 GHz,等离子功率 4 kW,试验所得合成气中 H₂ 占 48%,CO 占 23%,CO₂ 占 25%,CH₄ 占 4%^[16-17]。

与空气等离子气化相比,水蒸气等离子气化的性能更具优势。在等离子功率为 30 ~ 100 kW、气化温度 1 800 ~ 4 000 K、煤流量为 2 ~ 10 kg/h、气化剂流量为 0.5 ~ 10 kg/h 条件下,以水蒸气为气化剂

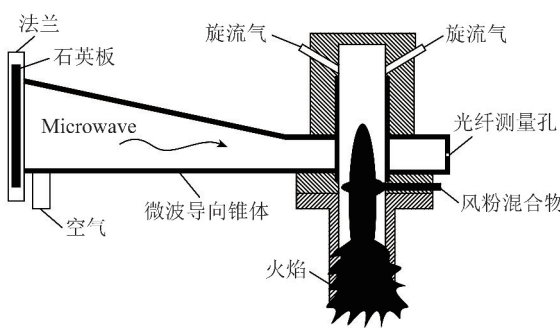


图 3 微波等离子体发生装置

Fig. 3 Microwave plasma generator

时,气化产生的合成气中有效气(CO+H₂)含量达 96.4%,而以空气为气化剂时,有效气(CO+H₂)含量仅为 55.8%^[18]。

综上所述,水蒸气等离子体煤气化技术较常规煤气化相比,具有反应区能量密度高、合成气中 CO 和 H₂ 含量高、气化效率高等优点,同时也降低了对原料煤的特殊要求。然而,由于等离子体气化使用的气化剂具有氧化性,在一定程度上加快了电极的损耗,缩短了其使用寿命。因此,很多学者开展了等离子体辅助煤气化研究。

1.2 等离子体辅助煤气化

等离子体辅助煤气化既可用空气、氧气等气化剂为工作气体,也可以用氮气、氩气等气体,放电产生等离子体,由等离子体提供的活性组分和热量,引发或加速煤与其他气化剂的煤气化过程,实现了气化剂与工作气体的分离,其本质是不追求碳的转化率^[19-22]。

李明东等^[23]采用独立组元法对煤气化反应的 C-H-O-S-N 热力学平衡体系进行计算,研究表明,气化炉出口温度为 1 600 K 时,产物中 CO 和 H₂ 含量较高,并在此基础上,提出了一种等离子体辅助下两段煤气化方案:第 1 段引入氧等离子体形成 3 000 ~ 3 300 K 的高温活性中心,同时供入一定量的煤粉和氧气;第 2 段入口处引入另一部分煤粉和一定量的水蒸气发生水煤气反应,调节最终反应体系的温度为 1 600 K 左右,使煤气成分得到改善。

庞先勇等^[24-25]采用中试规模的立式和卧式 2 种反应装置进行试验研究,其最佳气量分别为 15 Nm³/h 和 18 Nm³/h,最佳供煤量分别为 8.5 kg/h 和 7.5 kg/h,最佳的输入功率分别为 45 kW 和 100 kW,水蒸气流量分别为 10 kg/h 和 8.5 kg/h。立式反应器除了产气量低于卧式反应器外,在输入功率、能耗等方面均具有明显的优势。此外,还通过等离子体炬辅助煤气化动力学研究,推导出气化过程中的主要气相产物 H₂、CO 和 CO₂ 的速率方程。

通过对等离子体炬辅助煤气化过程中活性组分研究发现,激发态氧与水分子的氧原子直接作用可明显改变水分子结构,更有利于断键形成自由基 $\text{OH} \cdot$, 自由基 $\text{OH} \cdot$ 可与煤中的碳发生反应^[26]。董光华等^[26]通过对试验数据进行回归分析,得到主要产物 H_2 、 CO 和 CO_2 体积分数的回归方程,提出活性组分诱发煤气化反应的可能化学反应通道。

等离子体辅助煤气化技术实现了气化剂与工作气体的分离以及发生器和反应器的分离,但其处理煤量低、能耗高,目前仅处于试验阶段,若实现工程应用还需要进一步提高煤处理规模,降低能耗。

1.3 CO_2 等离子体煤气化技术

近年来,随着 CO_2 等温室气体大量排放导致的环境和气候问题日益严峻,科研人员对煤的 CO_2 等离子体煤气化进行诸多研究。Matveev 等^[27]模拟研究了不同气化剂的等离子体煤气化过程,探究了空气、富氧空气、水蒸气、 CO_2 以及 CO_2 和 H_2O 混合物等气化剂对气化过程的影响,发现等离子体煤气化过程在不同气化剂作用下的碳转化率均较高, CO 与 H_2 含量均在 95% 以上,其中,以 CO_2 或 CO_2 和 H_2O 混合物作为气化剂时,其气化效率要比以空气作为气化剂时高,可以认为在等离子体煤气化过程中, CO_2 作为气化剂是十分可行的。

Alfantazi 等^[28]、Lelievre 等^[29]对 CO_2 和 O_2 混合物为气化剂的等离子体煤气化过程进行研究,在不同煤种条件下分别研究了 CO_2 和 O_2 混合物的比例、床层高度、等离子输入功率等因素对气化结果的影响。试验结果表明,当 CO_2 和 O_2 比例为 3:1 时,气化产物中 CO 和 H_2 的含量最大,说明等离子体能够有效提高气化温度及合成气含量。潘腾云^[30]研究了 CO_2 旋转弧等离子体煤气化技术,针对煤种性质、 CO_2 进气量、输入功率及进料比对煤气化过程的影响进行了探究,表明能量转化效率最高值可达 71.6%,碳转化率最高为 90.4%,最优气化条件:煤粉进料为 28 g/min, CO_2 流量为 1 Nm^3/h , 输入功率为 15.2 kW。

目前, CO_2 等离子体煤气化技术也存在煤粉处理量较低、能耗较高的问题,但是 CO_2 等离子体煤气化技术为煤炭的清洁利用和 CO_2 的资源化利用提供了可以借鉴的方法。

2 等离子体煤气化技术在燃煤锅炉的应用

煤的等离子体气化技术除了在煤化学、化工领域具有潜在的巨大应用前景外,还可用于大型电站燃煤锅炉的点火启动。一方面,可利用等离子体煤

气化所产生的煤气代替燃煤锅炉点火时所消耗的燃油,另一方面,也可通过等离子体煤气化降低氮氧化物排放量,具有良好的经济效益和环境效益。

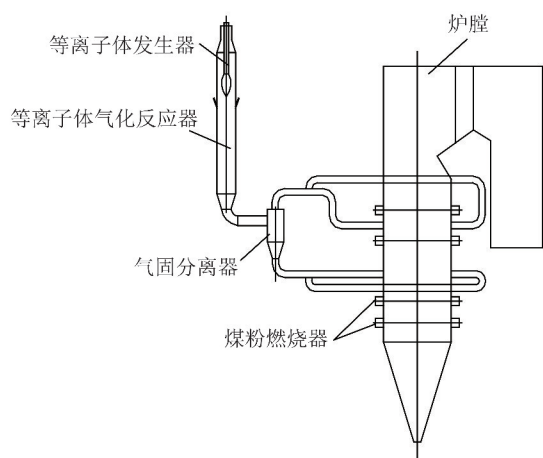
目前,俄罗斯热电行业中,已有多座电站在燃煤锅炉的点火启动中采用等离子体煤气化技术^[31]。吴敏^[32]对水射流等离子体点火技术进行了数值模拟研究,表明燃烧室内产生的 CO 体积分数是无水射流时的 4 倍,在喷水量 0.8 kg/s 时, CO 体积分数最高; H_2 体积分数是无水射流时的 5 倍,在喷水量 1 kg/s 时 H_2 体积分数最高。水射流等离子体点火技术把等离子点火与煤粉的水煤气反应相结合,提高了低挥发分煤粉的点火与燃烧性能。分析认为,与常规等离子体点火技术相比,等离子体煤气化技术成本较高,但相对于燃用低挥发分煤的煤粉锅炉每年上千吨的节油量,经济效益显著。

Frolov 等^[33]研究了煤的热等离子体气化技术在热电行业中的应用,发现煤的等离子体气化所得的合成气中, CO 体积分数达 48%, H_2 体积分数达 50%, 该煤气用于发电可大大降低燃煤发电时产生的氮氧化物排放量,与常规燃煤发电所产生的污染物量相比,其排放量可降低 90% 左右。

烟台龙源电力技术股份有限公司^[34]利用等离子体辅助煤气化技术生产的 H_2 、 CH_4 、 CO 等气体,作为再燃燃料喷入锅炉炉膛以还原已生成的 NO_x 。同时,通过气体再燃技术对主燃区进行空气分级燃烧处理,使气体再燃与双尺度空气分级这 2 种低 NO_x 燃烧技术的优势互补,从而达到 NO_x 超低排放,解决了锅炉再燃降氮所需大量天然气的难题,低 NO_x 燃烧系统如图 4 所示。目前,烟台龙源电力技术股份有限公司完成了处理煤量为 0.5 ~ 3.0 t/h 的煤气化试验,研究了过量空气系数、煤粉浓度、温度场等因素对气化产物的影响规律,其气化产物已达到工程应用条件。因此,在电站煤粉锅炉进行等离子体辅助煤气化尝试性试验,在等离子体发生器功率为 60 kW 的条件下,最大处理煤量可高达 5 t/h,实现了低能耗的等离子体辅助煤气化,具有很好的工业应用前景。据估算,以一台 300 MW 电站燃煤锅炉为例,在采用等离子体煤气化技术后,可在原基础上使锅炉出口氮氧化物排放量再降低 50% 以上,其初投资略低于 SCR 脱硝技术,而运行费用则仅为 SCR 的一半,具有良好的经济和环境效益。

3 结 语

等离子体煤气化技术是一种能够实现煤炭超洁

图4 低 NO_x 煤粉燃烧系统Fig. 4 Low NO_x coal combustion system

净利用的新技术,具有较大的潜在应用前景。但我国等离子体煤气化技术研究工作起步较晚,规模较小且处于基础试验研究阶段,由于存在煤处理量低、能耗高等问题,使得该技术难以应用于实际工程中,而近几年的相关研究也基本处于停滞状态。若将基于等离子体点火的内燃技术引入等离子体煤气化技术,可大幅提高煤处理规模、降低能耗,与低 NO_x 燃烧技术相结合,将会推动其在电站燃煤锅炉技术领域的快速发展,成为一种具有广阔工业应用前景的煤炭清洁高效利用手段。

参考文献 (References):

- [1] XIE J, ZHONG W, JIN B, et al. Eulerian-Lagrangian method for three-dimensional simulation of fluidized bed coal gasification [J]. *Advanced Powder Technology*, 2013, 24(1): 382-392.
- [2] WATANABE H, OTAKA M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier [J]. *Fuel*, 2006, 85(12/13): 1935-1943.
- [3] SPEIGHT J G. *The Chemistry and Technology of Coal* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [4] FINCKE J R, ANDERSON R P, HYDE T, et al. Plasma thermal conversion of methane to acetylene [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2000, 22(1): 105-136.
- [5] VOGULKIN V E, GORBUNOV A V, MOSSE A L, et al. Synthesis of acetylene from propane-butane in the DC plasma reactor with downed jet quenching of pyrogas [J]. *High Temp. Mater Processes*, 2005, 9(3): 463-471.
- [6] HLINA M, HRABOVSKY M, KAVKA T, et al. Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste [J]. *Waste Management*, 2014, 34(1): 63-66.
- [7] 张孝勇, 陈学渊, 罗泽斌, 等. 等离子点火技术在燃煤锅炉上的应用 [J]. *中国电力*, 2002, 35(12): 15-18.
- [8] RUI B, GHOSH S. Technological aspects for thermal plasma treatment of municipal solid waste—a review [J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 126: 298-308.
- [9] HOBBS M L, RADULOVIC P T, SMOOT L D. Modeling fixed-bed coal gasifiers [J]. *AIChE J.*, 1992, 38(5): 681-702.
- [10] GEORGIEV I B, MIHAILOV B I. Some general conclusion from the results of studies on solid fuel steam plasma gasification [J]. *Fuel*, 1992, 71(8): 895-901.
- [11] KALINENKO R A, KUZNETSOV A P, LEVITSKY A A, et al. Pulverized coal plasma gasification [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1993, 13(1): 141-167.
- [12] PLOTEZYK W W, RESZTAK A, SZYMANSKI A. The plasma processing of brown coal [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 1995, 10(3-6): 530-540.
- [13] QIU Jieshan, HE Xiaojun, SUN Tianjun, et al. Coal gasification in steam and air medium under plasma conditions: A preliminary study [J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85: 969-982.
- [14] HE Xiaojun, MA Tengcai, QIU Jieshan, et al. Mechanism of coal gasification in a steam medium under arc plasma conditions [J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2004, 13(3): 446-453.
- [15] HE Xiaojun, ZHENG Mingdong, QIU Jieshan, et al. The formation mechanism of CO_2 and its conversion in the process of coal gasification under arc plasma conditions [J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2006, 15(2): 246-252.
- [16] YONG C H, SANG J L, SHIN D H, et al. Syngas production from gasification of brown coal in a microwave torch plasma [J]. *Energy*, 2012, 47(1): 36-40.
- [17] DONG H S, YONG C H, SANG J L, et al. A pure steam microwave plasma torch: gasification of powdered coal in the plasma [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 228(9): 520-523.
- [18] MESSERLE V E, USTIMENKO A B, LAVRICHSHEV O A. Comparative study of coal plasma gasification: Simulation and experiment [J]. *Fuel*, 2016, 164(15): 172-179.
- [19] 谢克昌, 田亚峻, 陈宏刚, 等. 煤在 H_2/Ar 电弧等离子体中的热解 [J]. *化工学报*, 2001, 52(6): 516-521.
- [20] XIE Kechang, TIAN Yajun, CHEN Honggang, et al. Coal pyrolysis in ARC plasma jet [J]. *CIESC Journal*, 2001, 52(6): 516-521.
- [21] DAI Bo, FAN Yousan, YANG Jiyan, et al. Effect of radicals recombination on acetylene yield in process of coal pyrolysis by hydrogen plasma [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(7): 957-959.
- [22] 侯来灵, 杨惠平, 靳瑛, 等. 离子体煤裂解测控方案的探讨 [J]. *煤炭转化*, 2001, 24(3): 65-69.
- [23] HOU Lailing, YANG Huiping, JIN Ying, et al. Discussion of the measurement and control programme for plasma coal splitting decomposition process [J]. *Coal Conversion*, 2001, 24(3): 65-69.
- [24] 谢克昌, 陈宏刚, 田亚峻, 等. H_2/Ar 等离子体射流反应器的模拟 [J]. *化工学报*, 2001, 52(5): 389-395.
- [25] XIE Kechang, CHEN Honggang, TIAN Yajun, et al. Simulation on H_2/Ar thermal plasma jet reactor [J]. *CIESC Journal*, 2001, 52(5): 389-395.
- [26] 李明东, 邓巍巍, 鲍卫仁, 等. 等离子体炬辅助煤气化的初步研究 [J]. *煤炭转化*, 2004, 27(4): 17-20.
- [27] LI Mingdong, DENG Weiwei, BAO Weiren, et al. Preliminary study on plasma auxiliary coal gasification [J]. *Coal Conversion*,

- 2004,27(4):17-20.
- [24] 李松栋,庞先勇,鲍卫仁,等. 煤在新型等离子体反应器内的气化[J]. 太原理工大学学报,2004,35(5):511-514.
- LI Songdong, Pang Xianrong, BAO Weiren, et al. Plasma coal gasification in a new type of reactor[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2004,35(5):511-514.
- [25] 庞先勇. 等离子体炬辅助煤气化研究[D]. 太原:太原理工大学,2007.
- [26] 董光华,庞先勇. 等离子体炬辅助煤气化中活性组分的作用[J]. 煤炭转化,2012,35(1):20-23.
- DONG Guanghua, PANG Xianrong. Active ingredients action in the plasma jet aid coal gasification[J]. Coal Conversion,2012,35(1):20-23.
- [27] MATVEEV I B,MESSERLE V E,USTIMENKO A B. Plasma gasification of coal in different oxidants[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2008,36(6):2947-2954.
- [28] ALFANTAZI A,PICKLES C. Effect of plasma on offgas produced in CO_2-O_2 coal gasification process[J]. Ironmaking Steelmaking,1994,21(1):64-72.
- [29] LELIEVRE C,PICKLES C A,HULTGREN S. Plasma-augmented fluidized bed gasification of sub-bituminous coal in CO_2-O_2 atmospheres[J]. High Temp Mater Processes,2015,35(1):89-101.
- [30] 潘腾云. CO_2 旋转弧等离子体煤气化制取合成气的研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [31] 邱介山,何孝军,马腾才. 煤的水蒸气等离子体气化研究现状和前景[J]. 煤炭转化,2002,25(2):1-6.
- QIU Jieshan,HE Xiaojun,MA Tengcai. Prospect and current status of coal gasification under steam plasma condition[J]. Coal Conversion,2002,25(2):1-6.
- [32] 吴敏. 水射流对等离子点火燃烧过程影响的研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [33] FROLOV V,PUKHOV A,TSEITLIN M,et al. Metallurgical application of hydrogen - containing gases produced by the plasma coal-gasification process at an environmentally clean thermal power-station[J]. International Journal of Hydrogen Energy,1993,18(8):665-672.
- [34] 李明,孙树翁,龚泽儒,等. 低 NO_x 燃烧方法和低 NO_x 燃烧系统;CN105805729A[P]. 2016-07-27.