

基于 Aspen Plus 的西部典型煤化学链气化模拟研究

潘鑫, 胡修德, 马晶晶, 袁妮妮, 郭庆杰

(宁夏大学 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要: 面对全球变暖, 发展低能、低碳、环保的新型煤炭综合利用技术迫在眉睫。化学链技术是一种新型的化学转化和能源利用新技术。利用 Aspen Plus 软件建立化学链气化过程, 模拟研究中试规模下, 西部典型煤和煤中水分含量对化学链气化过程的影响, 结合煤中组分与气化过程, 分析不同煤种产生不同合成气含量的原因; 并提出了模拟煤中不同水分的方法, 分析水分如何影响化学链气化过程, 为中试放大提供理论指导。结果表明, 宁夏羊场湾煤 (NX) 和陕西神木煤 (SX) 的合成气产率 (以煤计) 高于 $2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$, 冷煤气效率高于 0.9。云南昭通煤 (YN) 合成气产率低于 $1.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$, 冷煤气效率最低, 合成气产率和冷煤气效率为: $\text{NX} > \text{SX} > \text{新疆伊犁煤 (XJ)} > \text{内蒙鄂尔多斯煤 (NM)} > \text{YN}$; 因水分会增加水蒸汽带走热量, 煤中水分含量越高越不利于气化。煤中含水量从 22.38% 降到 0 时, 合成气产率增大, 冷煤气效率增大了 34.5%。气化反应器所需热量降低了 8.89%。因此, 为得到更多的合成气, 尽量选择固定碳高、水分少及挥发分低的煤种作为原料; 在煤进入气化炉前增设干燥装置, 提高合成气产率和冷煤气效率。

关键词: 化学链; 气化; Aspen Plus; 西部典型煤

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)01-0233-06

Simulation study on chemical looping gasification of typical coal in Western China based on Aspen Plus

PAN Xin, HU Xiude, MA Jingjing, YUAN Nini, GUO Qingjie

(State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In the face of global warming, it is urgent to develop new comprehensive utilization technology of coal with low energy, low carbon and environmental protection. Chemical looping technology is a new technology of chemical conversion and energy utilization. Aspen Plus software was used to establish the chemical looping gasification process. The influence of typical coal and moisture content on chemical looping gasification process in western China was simulated on a pilot scale. Combined with the coal composition and gasification process, the reasons for different syngas content produced by different coal types were analyzed. The method to simulate different moisture content in coal was proposed to analyze how moisture affects chemical looping gasification process, which provided theoretical guidance for pilot scale enlargement. The results show that the syngas yield of coal of Yangchangwan Coal in Ningxia (NX) and Shenmu coal in Shaanxi (SX) is higher than $2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ (coal), and the cold gas efficiency is higher than 0.9. The syngas yield from coal of Zhao-tong coal in Yunnan (YN) is lower than $1.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ (coal) and the cold gas efficiency is the lowest. The syngas yield and the cold gas efficiency are as follows: $\text{NX} > \text{SX} > \text{Yili coal in Xinjiang (XJ)} > \text{Erdos coal in Inner Mongolia (NM)} > \text{YN}$. Because moisture increases steam and carries away heat, the higher the moisture content in coal is, the worse the gasification is. When the water content in coal drops from 22.38% (wt) to 0, the yield of syngas increases and the efficiency of cold gas increases by 34.5%. The heat required for gasification reactors is reduced by 8.89%. Therefore, in terms of raw material selection, in order to get more syngas, coal with high fixed carbon, less moisture and low volatile matter should be selected as raw material. The drying device is added before the coal enters the gasifier to improve the

收稿日期: 2020-10-21; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.A20102101

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB0605401); 国家自然科学基金资助项目 (21868025); 宁夏回族自治区重点研发计划资助项目 (2018BCE01002); 宁夏高等学校科研项目 (NGY2018266)

作者简介: 潘鑫 (1995—), 男, 甘肃陇西人, 硕士研究生, 研究方向为煤炭清洁利用。E-mail: 15709515724@163.com。通讯作者: 郭庆杰, 博士生导师, 研究方向为煤炭/焦炭化学链高效气化及放大规律。E-mail: qingjie_guo@163.com

引用格式: 潘鑫, 胡修德, 马晶晶, 等. 基于 Aspen Plus 的西部典型煤化学链气化模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 233-238.

PAN Xin, HU Xiude, MA Jingjing, et al. Simulation study on chemical looping gasification of typical coal in Western China based on Aspen Plus [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 233-238.



移动阅读

yield of syngas and the efficiency of cold gas.

Key words: chemical looping; gasification; Aspen Plus; typical coal in Western China

0 引言

面对全球变暖的趋势、环境污染严重的现状以及我国贫油、少气、富煤的能源布局,煤炭是中国目前乃至今后相当长一段时期内的主要能源^[1]。推行和大力发展低能、低碳、环保的新型煤炭综合利用技术迫在眉睫。

化学链技术 (Chemical looping technology) 是一种新型的化学转化和能源利用新技术^[2-4],其中,化学链燃烧较成熟,在国内外已有半工业规模装置,如达姆施塔特工业大学 (德国 TUD) 1 MW_{th} 的 CLC 装置^[5]和查默斯理工大学 (瑞典 CUT) 4 MW_{th} 的 CLC 锅炉^[6];东南大学^[7]建造了加压条件下的 50 kW_{th} CLC 装置,华中科技大学^[8-9]设计建造了 5 kW_{th} 和 50 kW_{th} CLC 装置,但 CLG 仍处于试验和模拟阶段。因此,研究中试规模下,不同参数对气化过程的影响,可为放大过程提供操作参数。

许多学者对化学链气化过程进行了模拟研究。扈佳玮等^[10]模拟研究了载氧体 (Cu : Fe) 及其当量比、水蒸气流量及系统运行温度对气化指标的影响;赵坤等^[11]利用 Aspen Plus 模拟了生物质化学链气化制合成气过程,分析了温度、压力、载氧体等对气化过程的影响;黄振等^[12]建立了以 Fe₂O₃ 为载氧体的生物质化学链气化模型,研究了燃料反应器内载氧体/生物质比、反应温度、水蒸气/生物质比、CO₂/生物质比等对化学链气化的影响;Gong 等^[13]用 Aspen Plus 软件建立了以煤焦油为燃料、Fe₂O₃ 为氧载体的化学链热解 (CLP) 系统,并对燃料反应器 (FR) 和空气反应器 (AR) 在不同工况下的反应速率和产率变化进行测试和分析;张建社^[14]模拟了 10 MW_{th} 煤基化学链气化过程,优化了气化中试装置操作参数,并且分析对产物分布和系统的影响因素。以上模拟研究在放大过程中,主要关注温度、压力、水碳比、氧碳比对气化过程的影响,鲜见中试规模下不同煤种和煤中水分对整个气化过程的影响研究。

本文通过 Aspen Plus 模拟研究中试规模下煤种和煤中水分对气化过程的影响;结合煤中组分与气化过程,分析不同煤种产生不同合成气含量的原因;并提出了模拟煤中不同水分的方法,分析水分如何影响化学链气化过程,为中试放大提供理论指导。

1 煤化学链气化

以煤为原料的化学链气化是在载氧体提供晶格氧和热量的作用下,将煤转化为合成气;同时,加入水蒸汽或 CO₂ 作为气化剂和流化剂,以提高合成气含量和调控合成气成分,该过程在气化反应器中进行;被还原的载氧体失氧后,在空气反应器中与空气直接反应,燃烧补氧再生,此过程在空气反应器中进行。整个气化过程在多个反应器内进行,实现多个反应物的非直接接触和产物的直接分离,实现了能量梯级利用和过程强化^[15],其过程如图 1 所示。

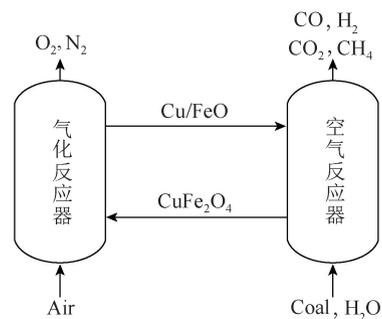


图 1 化学链气化示意

Fig.1 Schematic diagram of chemical looping gasification

作为连接气化反应器和空气反应器桥梁的载氧体,是氧和能量的载体^[16]。通过循环氧化还原反应,不断向燃料提供氧和热,将煤转化为合成气。以煤为原料、CuFe₂O₄ 为载氧体、水蒸汽为气化剂的化学链气化过程发生的主要反应见表 1。其中,CuFe₂O₄ 载氧体不仅能提高气化速率,且可提高铜基载氧体的抗烧结性能^[17-18]。

2 建模

2.1 模型选择

AspenPlus 是功能强大的集化工设计、动态模拟等计算于一体的大型通用过程模拟软件^[19]。基于 Aspen Plus 软件,对不同煤种在 CuFe₂O₄ 载氧体作用下的气化建立过程模型,包括 3 个反应器 (热解反应器 Decomposition、气化反应器 Gasifier 和空气反应器 Burner)、3 个产物分离模块 (旋风分离、闪蒸罐)、12 个物流流股。其中,热解反应器选用 RStoic (化学计量反应器) 反应模块,该模块通过化学反应式计量系数和反应程度,可将组分复杂的煤转换为: C、S、H₂、N₂、O₂、H₂O 及灰 (Ash), 反应方程式为 Coal → C + S + H₂ + N₂ + O₂ + H₂O + Ash, 最后由 Calculate

中编写 Fortran 语句计算热解生成的各物质含量^[20]。

表 1 气化过程主要反应

Table 1 Main reactions of gasification process

反应方程式	$\Delta H/$ (kJ · mol ⁻¹)	反应 编号
2C+O ₂ →2CO	-110.54	R1
C+O ₂ →CO ₂	-393.51	R2
C+H ₂ O→CO+H ₂	110.3	R3
C+CO ₂ →2CO	172.42	R4
CO+H ₂ O→CO ₂ +H ₂	-41.12	R5
2CO+O ₂ →2CO ₂	-565.93	R6
2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	-483.63	R7
CH ₄ +H ₂ O→CO+3H ₂	223.73	R8
4C+3CuFe ₂ O ₄ →3Cu+2Fe ₃ O ₄ +4CO	221.98	R9
2C+3CuFe ₂ O ₄ →3Cu+2Fe ₃ O ₄ +2CO ₂	-122.94	R10
2C+CuFe ₂ O ₄ →Cu+2FeO+2CO	212.87	R11
C+CuFe ₂ O ₄ →Cu+2FeO+CO ₂	40.41	R12
4H ₂ +3CuFe ₂ O ₄ →3Cu+2Fe ₃ O ₄ +4H ₂ O	-303.19	R13
2H ₂ +CuFe ₂ O ₄ →Cu+2FeO+2H ₂ O	-49.72	R14
4CO+3CuFe ₂ O ₄ →3Cu+2Fe ₃ O ₄ +4CO ₂	-467.86	R15
2CO+CuFe ₂ O ₄ →Cu+2FeO+2CO ₂	-132.05	R16
CH ₄ +3CuFe ₂ O ₄ →Cu+2Fe ₃ O ₄ +CO ₂ +2H ₂ O	-138.26	R17
CH ₄ +2CuFe ₂ O ₄ →2Cu+4FeO+CO ₂ +2H ₂ O	65.50	R18
3CuFe ₂ O ₄ →3Cu+2Fe ₃ O ₄ +4[O]	664.08	R19
CuFe ₂ O ₄ →Cu+2FeO+2[O]	433.92	R20

表 2 煤样的工业分析和元素分析

Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis of coal samples

Sample	Proximate analysis/%				Ultimate analysis/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ · kg ⁻¹)
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O_{ad}^{a}	
NX	5.18	4.56	26.95	63.31	77.6	5.16	1.46	0.46	10.77	24.71
SX	7.10	5.88	29.71	57.31	69.08	7.17	0.76	0.30	14.03	25.23
XJ	9.06	3.55	28.07	59.32	76.06	3.50	0.29	0.44	15.83	23.34
NM	11.52	5.07	27.26	56.15	74.08	4.91	0.70	0.02	14.29	26.58
YN	22.38	23.5	30.98	23.14	45.86	2.85	1.20	1.15	18.67	12.61

注:a 表示采用差减法。

合成气产率 η (Nm³/kg) 定义为 0 °C、101.3 kPa 下,每千克煤气化能产生的合成气(CO+H₂+CH₄)量,计算公式为

$$\eta = \frac{V(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)}{m_{\text{C}}} = \frac{n(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)}{m_{\text{C}}} \frac{RT}{P} \quad (1)$$

式中, $V(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)$ 为标况下合成气体积; $n(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)$ 为合成气物质的量,kmol; m_{C} 为煤

气化反应器和空气反应器选用 RGibbs(吉布斯反应器)反应模块,通过 Gibbs 自由能最小化,计算化学平衡和相平衡,即反应过程中,反应达到平衡时,体系吉布斯自由能最小^[21]。气化反应器中涉及到的物质有 C、CO、CO₂、CH₄、S、H₂S、COS、CS₂、SO₂、SO₃、H₂、H₂O、N₂、NO、NO₂、NH₃、HCN、O₂、COAL、ASH、CuFe₂O₄、Cu₂O、Cu、Fe₃O₄、FeO、Fe。煤基化学链气化工艺流程如图 2 所示。

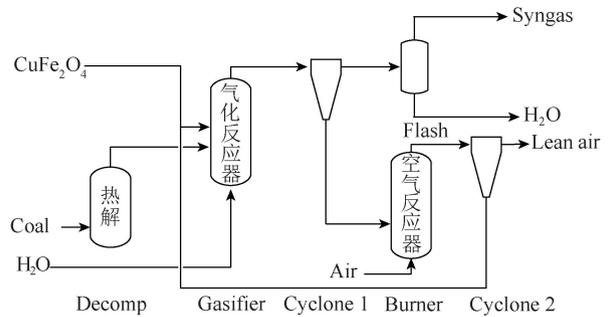


图 2 煤化学链气化流程

Fig.2 Flow chart of coal chemical looping gasification

2.2 计算条件

影响化学链气化过程的因素有氧碳比(O/C)、水碳比(H₂O/C)、气化温度(T)、压力(P)、煤种及水分等。本文以西部典型煤为原料,分别为宁夏羊场湾煤(NX)、陕西神木煤(SX)、新疆伊犁煤(XJ)、内蒙鄂尔多斯煤(NM)和云南昭通煤(YN),其工业分析和元素分析见表 2。气化条件:25 °C、101.3 kPa,原煤进料 3 MW_{th},H₂O/C=1.0、O/C=1.5^[22-23]。

的质量,kg。

冷煤气效率计算公式为

$$\alpha = \frac{\sum Q(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, α 为冷煤气效率; $\sum Q(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)$ 为合成气低位热值,MJ/kg; $Q_{\text{net,ar}}$ 为煤的低位热值,MJ/kg。

3 结果与讨论

3.1 煤种对气化过程的影响

不同煤中水分、灰分、挥发分和固定碳含量不同。因此,在相同气化条件下,产生的合成气组分、产率和热值不同,但也呈现一定的规律性。

图3为5种煤样的气化产物分布及合成气产率

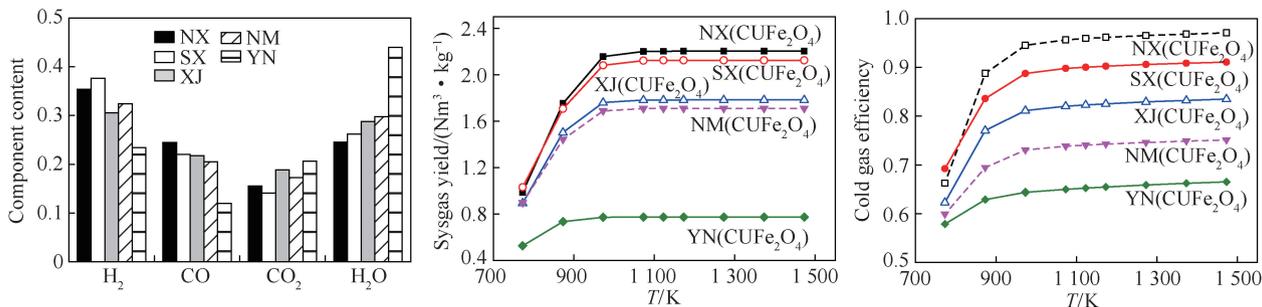


图3 煤样的气化产物分布和冷煤气效率

Fig.3 Gasification products distribution of coal samples and cold gas efficiency

NX和SX煤的固定碳较高、水分较低;YN煤的固定碳最低,水分最高;XJ和NM煤介于之间。因此,煤中固定碳越高、水分越少,越有利于合成气的生成。水分越低、固定碳越高,气化过程中转化为焦油的机会就越低,因此,更多的碳转化为合成气^[24]。煤与载氧体接触后,载氧体提供热量,煤发生热解,热解产生热解气($\text{CO}+\text{H}_2$)和焦炭,部分热解气会与载氧体中的氧反应生成 CO_2 和 H_2O (R6、R7),焦炭和气化剂反应生成合成气(R3~R5)。因此,对于水分高、挥发分多、固定碳低的煤,热解气多,进一步被氧化生成的 CO_2 和 H_2O 越多,生成合成气的碳越少。综上,在实际生产过程中,为得到更多的合成气,尽量选择固定碳高、水分少、挥发分低的煤种作为原料。

3.2 煤中水分对气化过程的影响

选择YN褐煤为研究对象;由于煤中水分蒸发

和冷煤气效率。可知,相比其他煤,NX和SX煤生成的 H_2 和 CO 含量最高, CO_2 和 H_2O 含量相对较低,合成气产率较高($>2.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$),冷煤气效率 >0.9 ;YN煤生成的 CO_2 和 H_2O 含量高,合成气产率最低($<1.0 \text{ Nm}^3/\text{kg}$),冷煤气效率最小;XJ和NM煤产生的合成气产率和冷煤气效率介于两者之间。合成气产率和冷煤气效率依次为 $\text{NX}>\text{SX}>\text{XJ}>\text{NM}>\text{YN}$ 。

进入燃料反应器,影响气化过程,故以 CO_2 为气化剂,整个研究过程不受气化剂水蒸汽本身的影响;保持煤中其他物质质量和条件(温度、压力、氧碳比、水碳比等)不变,减小煤中水的质量,进入气化反应器的量只有水发生了变化,确保变量的单一性,见表3。模拟结果如图4所示。煤中水分越低,合成气产率越高,低水分有利于气化。从图4(a)可得,随着煤中水分减少,气相产物中 H_2 和 H_2O 产率减小,但 CO 和 CO_2 产率增加,其中 CO 变化最大,这是因为煤中水分减少,导致氢源损失,气化产物中 H_2 产率减小;水分会加大水蒸汽带走的热量,而反应R4($\text{C}+\text{CO}_2\rightarrow 2\text{CO}$)为吸热反应,增温有利于平衡向右移动,低水分可减少带走的热量,反应器内部热量高,平衡右移, CO 产率增加, CO_2 产率也增加。由图4(b)可知,煤中水分越少,合成气产率越大,冷煤气效率也随之增大。

表3 煤中水分变量取值和各元素含量

Table 3 Value of moisture variables and content of each element in coal

Coal	质量/kg				M/ %	A/ %	V/ %	FC/ %	进气化反应器量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)						
	M	A	V	FC					C	S	H_2	N_2	O_2	H_2O	Ash
856.46	191.68	201.27	265.33	198.18	22.38	23.50	30.98	23.14	304.87	7.65	18.95	7.98	124.11	191.68	201.23
814.78	150.00	201.27	265.33	198.18	18.41	24.70	32.56	24.32	304.87	7.64	18.95	7.98	124.11	150.00	201.3
774.78	110.00	201.27	265.33	198.18	14.20	25.98	34.25	25.58	304.86	7.64	18.95	7.98	124.11	110.02	201.22
734.78	70.00	201.27	265.33	198.18	9.53	27.39	36.11	26.97	304.86	7.64	18.95	7.98	124.11	70.02	201.22
694.78	30.00	201.27	265.33	198.18	4.32	28.97	38.19	28.52	304.86	7.64	18.95	7.98	124.11	30.01	201.23
664.78	0	201.27	265.33	198.18	0	30.28	39.91	29.81	304.87	7.64	18.95	7.98	124.11	0	201.23

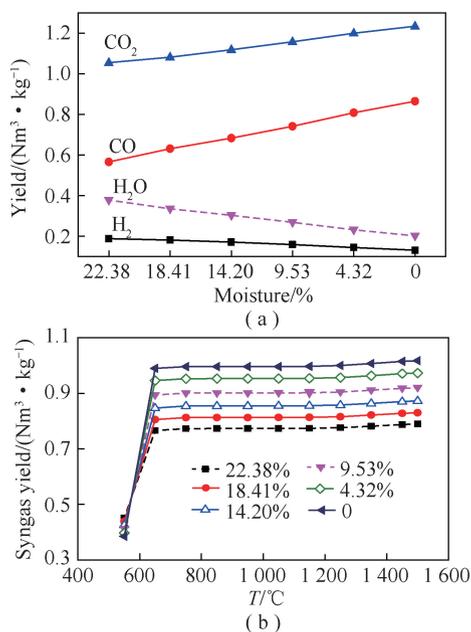


图4 煤中水分对气化过程的影响

Fig.4 Influence of water content in coal on gasification process

图5为煤中水分对冷煤气效率的影响,随着水分的减少,冷煤气效率从0.678增到0.912,增大了34.5%。图6为气化反应器所需热量 Q ,随着水分降低,气化反应器所需热从1.92 MW降到1.75 MW,减少了8.85%。因此,煤中水分对整个气化过程的热量影响很大,在实际气化过程中,气化剂水蒸汽的加入,需考虑煤中的含水量。

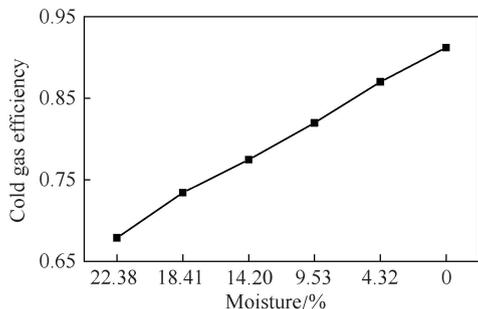


图5 煤中水分对冷煤气效率的影响

Fig.5 Effect of water content on efficiency of cold gas

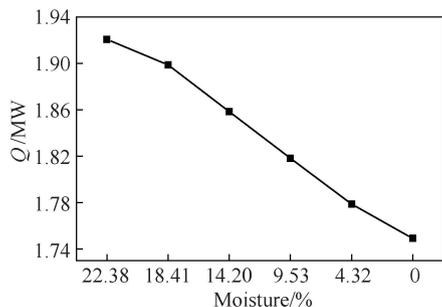


图6 气化反应器所需热量

Fig.6 Heat required for gasification furnace

煤中水分不利于气化过程,不仅会降低合成气

产率和冷煤气效率,且增加了系统热负荷,降低了气化效率。宋申等^[25]研究发现,煤样比表面积、孔体积均随煤样中水分的增大而减小。降低煤中水分对气化有利。因此,在化学链气化过程中,可在煤进入气化炉前增设干燥装置,减少煤的含水量,提高合成气产率和冷煤气效率,增强气化反应器热值。

4 结 论

1) 宁夏羊场煤(NX)和陕西神木(SX)合成气产率高于2.0 Nm³/kg,冷煤气效率大于0.9;云南昭通煤(YN)合成气产率低于1.0 Nm³/kg,冷煤气效率最低,不利于气化。合成气产率和冷煤气效率排序为NX>SX>XJ>NM>YN。

2) 煤中水分越低、固定碳含量越高,有利于合成气的生成。对于水分高、挥发分大、固定碳低的煤,热解气越多,进一步被载氧体氧化生成的CO₂和H₂O量越多。

3) 煤中水分高,不利于气化。褐煤含水量从22.38%降到0时,合成气产率增大;冷煤气效率从0.678增到0.912,增大了34.5%;气化反应器所需热量从1.92 MW降到1.75 MW,所需热量降低了8.89%。因此,在实际气化过程中,气化剂水蒸汽的加入,需考虑煤中含水量。

4) 过程强化:①为得到更多的合成气,尽量选择固定碳高、水分少及挥发分低的煤种作为原料;②在煤进入气化炉前增设干燥装置,提高合成气产率和冷煤气效率。

参考文献 (References):

- [1] 余长军. 煤化工技术发展现状及趋势[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(5): 27-30.
XU Changjun. Development status and trend of coal chemical industry technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2016, 39(5): 27-30.
- [2] MOGHTADERI B. Review of the recent chemical looping process developments for novel energy and fuel applications[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(1): 15-40.
- [3] ADANEZ J, ABAD A, GARCIA-LABIANO F, et al. Progress in chemical-looping combustion and reforming technologies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2): 215-282.
- [4] 刘永卓,郭庆杰,田红景. 煤化学链转化技术研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(6): 1357-1364.
LIU Yongzhuo, GUO Qingjie, TIAN Hongjing. Research progress in coal chemical looping conversion technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(6): 1357-1364.
- [5] STROHLE J, ORTH M, EPPLER B. Design and operation of a 1 MW_{th} chemical looping plant[J]. Applied Energy, 2014, 113:

- 1490-1495.
- [6] BERDUGO VILCHES T, THUNMAN H. Experimental investigation of volatiles-bedcontact in a 2-4 MW_{th} bubbling bed reactor of a dual fluidized bed gasifier [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29 (10): 6456-6464.
- [7] XIAO R, CHEN L, SAHA C, et al. Pressurized chemical-looping-combustion of coal using an iron ore as oxygen carrier in a pilot-scale unit [J]. *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 2012, 10: 363-373.
- [8] MA J, ZHAO H, TIAN X, et al. Chemical looping combustion of coal in a 5 kW_{th} interconnected fluidized bed reactor using hematite as oxygen carrier [J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 304-313.
- [9] MA J, ZHAO H, NIU P, et al. Design and operation of a 50 kW_{th} chemical looping combustion (CLC) reactor using coal as fuel [C]//4th International conference on chemical looping. Nanjing [s.n.], 2016.
- [10] 扈佳玮, 曾德望, 崔东旭, 等. 基于 Cu-Fe 基复合载氧体的褐煤化学链气化过程模拟 [J]. *工业控制计算机*, 2020, 33 (8): 94-96, 99.
HU Jiawei, ZENG Dewang, CUI Dongxu, et al. Simulation of lignite chemical looping gasification process based on Cu-Fe composite oxygen carrier [J]. *Industrial Control Computer*, 2020, 33 (8): 94-96, 99.
- [11] 赵坤, 何方, 黄振, 等. 生物质化学链气化制合成气模拟研究 [J]. *煤炭转化*, 2011, 34 (4): 87-92.
ZHAO Kun, HE Fang, HUANG Zhen, et al. Simulation study on synthesis gas from Biomass chemical looping gasification [J]. *Coal Conversion*, 2011, 34 (4): 87-92.
- [12] 黄振, 刘帅, 李德波, 等. 基于 Fe₂O₃ 载氧体的生物质化学链气化热力学模拟研究 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38 (5): 1421-1430.
HUANG Zhen, LIU Shuai, LI Debo, et al. Thermodynamic simulation of biomass chemical looping gasification based on Fe₂O₃ oxygen carrier [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2017, 38 (5): 1421-1430.
- [13] GONG Mingxin, GONG Jian, HU Xiude, et al. Optimization of chemical looping pyrolysis system of coal tar by combined simulation and experiments [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 33 (1): 595-602.
- [14] 张建社. 10 MW_{th} 煤基化学链气化过程模拟研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2012.
ZHANG Jianshe. Simulation study on 10 MW_{th} coal-based chemical looping gasification process [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2012.
- [15] 程煜, 刘永卓, 田红景, 等. 铁基复合载氧体煤化学链气化反应特性及机理 [J]. *化工学报*, 2013, 64 (7): 2587-2595.
CHENG Yu, LIU Yongzhuo, TIAN Hongjing, et al. Characteristics and mechanism of coal chemical looping gasification reaction of iron-based composite oxygen carrier [J]. *Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2013, 64 (7): 2587-2595.
- [16] ADÁNEZ J, ABA A, MENDIARA T, et al. Chemical looping combustion of solid fuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 65: 61-66.
- [17] 安梅, 潘鑫, 胡修德, 等. 化学链气化过程中 CuFe₂O₄/SiO₂ 载氧体的反应性能及次烟煤的结构演变 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2020, 36 (4): 777-783.
AN Mei, PAN Xin, HU Xiude, et al. Reaction properties of CuFe₂O₄/SiO₂ carrier and structural evolution of sub-bituminous coal during chemical looping gasification [J]. *Acta Petroli Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2020, 36 (4): 777-783.
- [18] WANG B W, WANG W S, MA Q, et al. In-depth investigation of chemical looping combustion of a Chinese bituminous coal with CuFe₂O₄ combined oxygen carrier [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30 (3): 2285-2294.
- [19] 孙兰义. 化工过程模拟实训-Aspen Plus 教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
SUN Lanyi. Chemical process simulation training - the Aspen Plus tutorial [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [20] 邓昌俊. 基于 Aspen Plus 的低阶煤液态 CO₂ 煤浆气化系统模拟研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
DENG Changjun. Simulation study on coal slurry gasification system of low-order coal based on Aspen Plus [D]. Hangzhou: Hanzhou Electronic Science and Technology University, 2016.
- [21] Aspen Plus. Aspen Plus model for moving bed coal gasifier [M]. USA: Aspen Technology, Inc, 2010.
- [22] 吴瑶. 基于 Aspen Plus 对耦合化学链燃烧的焦炉煤气重整制氢系统性能的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
WU Yao. Study on hydrogen production system of coke oven gas reforming with coupled chemical looping combustion based on Aspen Plus [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] 赵海波, 陈猛, 熊杰, 等. 化学链重整制氢系统的过程模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32 (11): 87-94, 150.
ZHAO Haibo, CHEN Meng, XIONG Jie, et al. Simulation of hydrogen production system by chemical chain reforming [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32 (11): 87-94, 150.
- [24] 申凤山. 浅析煤种、煤质对气化的影响 [J]. *化工技术与开发*, 2013, 42 (7): 36-37, 41.
SHEN Fengshan. The influence of coal type and coal quality on gasification is analyzed [J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2013, 42 (7): 36-37, 41.
- [25] 宋申, 王俊峰, 王涌宇, 等. 水分对褐煤微观特性的影响研究 [J]. *煤炭技术*, 2017, 36 (11): 330-333.
SUN Shen, WANG Junfeng, WANG Yongyu, et al. Study on the Influence of moisture on the microscopic characteristics of lignite [J]. *Coal Technology*, 2017, 36 (11): 330-333.