

# 煤基甲醇-直接还原铁联产系统的设计和分析

张佩<sup>1,2</sup>, 龚志军<sup>1,2</sup>, 于戈文<sup>2</sup>, 武文斐<sup>1,2\*</sup>, 张智羽<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**以 Shell 粉煤气化为背景, 以多联产能源梯级利用理论为基础, 提出甲醇-直接还原铁串联生产工艺。借助化工流程模拟软件 Aspen Plus 对分产和联产系统进行模拟。通过能量衡算, 计算出单产甲醇的能耗为 39.7 GJ/t, 直接还原铁的能耗为 11.7 GJ/t。以相对节能率为评价准则, 比较分产系统和联产系统的性能, 发现联产系统相对节能率达到 7.93%。又简单分析了联产和分产系统中能量的分布和转移, 发现弛放气和尾气的利用是系统性能改善的主要原因。

**关键词:**多联产; 甲醇; 直接还原铁; 节能率

中图分类号: TQ536.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)07-0142-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.07.035

## Design and analysis of coal based methanol-direct reduced iron (DRI) poly-generation system

ZHANG Pei<sup>1,2</sup>, GONG Zhi-jun<sup>1,2</sup>, YU Ge-wen<sup>2</sup>, WU Wen-fei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Zhi-yu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Key laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Baotou 014010, China)

**Abstract:** A methanol-direct reduced iron (DRI) poly-generation process is proposed, based on shell pulverized coal gasification and the principle of poly-generation cascaded utilization of energy. Aspen Plus software is used to simulate the separate production and co-generation process. For separate production system of methanol and iron, the methanol energy consumption is 39.7 GJ/t and DRI energy consumption is 11.7 GJ/t. With energy saving rate as an evaluation index, the performance of separate production system and the co-production system are compared. The results show that the relative energy saving rate of co-production system is 7.93%. The distribution and transfer of energy in two systems are also analyzed. The utilization of purge gas and tail gas is eventually found as the main cause for improvement of the performance.

**Key words:** poly-generation; methanol; direct reduced iron; energy-saving rate

21 世纪, 煤仍然是我国的能源支柱, 如何高效清洁地利用是当下以及未来所要探究的重要问题。从煤炭消费结构看, 我国煤炭主要集中于电力、冶金、化工和建材 4 大行业。因此要从根本上解决煤炭高效利用问题, 需要把目标放在这些煤基工业的重点行业。

传统冶金钢铁工业是高能耗、高污染产业, 而使用直接还原铁(DRI)炼钢因呈现出节能、环保、流程短等特性而备受关注。目前世界上直接还原铁工艺仍以天然气为主要原料, 受我国的能源结构制约, 我国主要发展煤基直接还原铁工艺。但现有的工艺距低能耗、低污染的炼铁目标还有一段距离, 因此发展

节能减排型煤基直接还原铁任重而道远<sup>[1]</sup>。

煤基化工产业在我国常以生产甲醇、二甲醚等化工产品为主。其中甲醇生产规模巨大, 年产量达到 4 500 万 t 以上。但盲目的生产导致国内甲醇市场出现了产能过剩、价格波动大等现象, 造成人力、财力及能源的浪费。因此根据市场需求, 灵活调节甲醇产量是亟待解决的问题。

煤基多联产是实现可持续发展的重要途径, 其特点在于突破行业限制, 构筑能源、化工的一体化, 达到生产过程整体最优<sup>[2]</sup>。为解决以上问题, 本文中从系统集成和学科交叉角度出发, 试图将多联产思想延伸到化工冶金领域。尝试将煤气化生产甲醇

收稿日期: 2015-12-01

基金项目: 内蒙古应用技术与开发资金计划项目(20130310); 内蒙古自然科学基金项目(2014MS0531); 内蒙古高校创新团队研究计划(NMGIRT1406); 包头市科技计划项目(2014Z1010-5); 煤基费托合成液体燃料-动力多联产系统超结构集成优化与经济分析研究项目(21466029); 煤基液体燃料-动力多联产系统有效能分析及优化集成理论研究项目(2014MS0210)

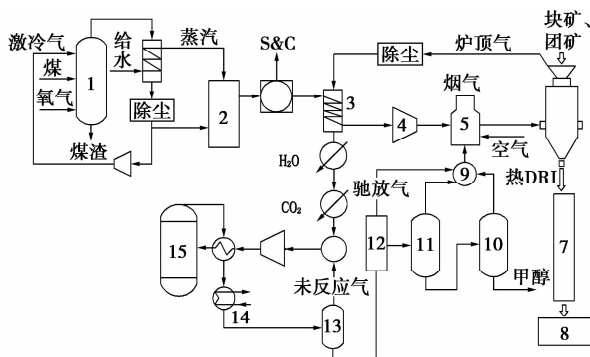
作者简介: 张佩(1991-), 女, 硕士生; 武文斐(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为高效洁净燃烧, 通讯联系人, wwf@imust.com。

和直接还原铁工艺联合生产,实现化工冶金领域从资源到能耗、工艺、排放的有机耦合。

## 1 甲醇-直接还原铁多联产系统的设计和构思

### 1.1 联产系统设计

结合甲醇和 DRI 生产工艺和多联产系统整合思想,本文中设计构思了甲醇-DRI 联合生产工艺。设计思路是还原气一次性通过直接还原单元,炉顶气及输出煤气全部用于生产甲醇,尾气用来作加热新鲜还原气的燃料。如图 1 所示,该系统由流化床粉煤气化单元、粗煤气变换和净化单元、直接还原铁单元及甲醇合成单元组成。粉煤经气化装置生产出( $\text{CO} + \text{H}_2$ )干基摩尔分数大于 90% 的合成气,经过水煤气耐硫变换单元将合成气的氢碳比调至 2 以上。通过脱硫、脱碳等净化单元后得到符合生产直接还原铁要求的新鲜还原气。还原气通过竖炉和矿石发生还原反应,热产物 DRI 经过渗碳后通过气力输送装置供应电弧炉炼钢<sup>[3]</sup>。炉顶气经过余热回收和除尘冷却处理后,未反应气不作循环利用,压缩后直接送入甲醇合成单元。甲醇合成过程产生的尾气用于加热新鲜还原气。



1—气化装置;2—变换单元;3—预热器;4—压缩机;  
5—PG加热器;6—竖炉;7—气力输送装置;8—电弧炉;  
9—混合器;10—二级精馏;11—一级精馏;12—内蒸槽;  
13—分离器;14—冷却器;15—甲醇合成塔

图 1 直接还原铁-甲醇多联产工艺流程图

在此多联产系统中各单元紧密耦合。与单产比较,多联产一方面避免了 DRI 分产系统中超过 60% 的未反应气循环利用所带来的问题,另一方面由于还原过程中  $\text{H}_2$  的反应速度较  $\text{CO}$  快<sup>[4]</sup>,炉顶气中氢碳比减小,不利于还原反应进行。与此同时,输出煤气和尾气也得到了合理利用。并且节省了用来加热还原气的燃烧气量,使得更多的还原气进入竖炉,得到更多的 DRI 产品。联产使系统内部能量利用趋

于合理,更好地实现了能量的梯级利用。

### 1.2 主要子系统

#### 1.2.1 煤样分析

单产和多联产都以低热值的胜利褐煤<sup>[5]</sup>作为原料,煤样分析如表 1 所示。

表 1 胜利褐煤空气干燥基煤样分析(质量分数)

煤样	元素分析/%				
	$W_c$	$W_H$	$W_N$	$W_S$	$W_O$
胜利褐煤	54.48	4.29	0.76	1.74	15.94
煤样	工业分析/%				QLIV/ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
	M	V	A	FC	
胜利褐煤	9.23	40.13	13.56	37.08	20.48

#### 1.2.2 合成气制备单元

研究证明,以粉煤加压气化为龙头的多联产系统在系统集成和优化方面较其他气化工工艺的多联产方案具有较大优势<sup>[6]</sup>。本文中选用 Shell 粉煤气化技术,用摩尔分数 95% 的纯氧进行干法加压气化<sup>[7]</sup>。在气化模拟过程中参数设定如下:氧煤比为  $0.369 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,载气煤比为  $0.1153 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,气化温度为  $1400^\circ\text{C}$ ,气化压力为  $3.5 \text{ MPa}$ 。粗煤气成分如表 2 所示。被激冷后的合成气由废热锅炉回收显热,副产  $5.2 \text{ MPa}$  的水蒸汽通入耐硫变换系统调节合成气氢碳。

表 2 Shell 煤气化模拟结果

煤气组成(摩尔分数)/%							
$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{COS}$
33.4	60.2	3.4	3.4	1.9	0.0548	0.7	0.7
总流量/( $\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$ )		有效气干基体积分数/%			冷煤气效率/%		
2108.86		96.8			82.6		

#### 1.2.3 直接还原铁系统

直接还原系统选用由意大利达涅公司和墨西哥 HYL/Energyiron 直接还原竖炉技术,该技术有以下特点:①生产效率高,该工艺竖炉炉内操作压力可达到  $0.5 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ,还原气和矿石能够充分接触,还原效率较高;②独立灵活, HYL/Energyiron 工艺所用还原气不局限于天然气,可以是焦炉煤气或气化煤气,同时还可以独立调节 DRI 中碳的质量分数(1% ~ 35%)和金属化率水平;③污染物排放少,炉顶气通过净化装置后, $\text{CO}_2$  和硫化物被脱除。

竖炉所用矿团的品位较高,一般为经过磁选的

精铁矿,全铁质量分数要达到 67% ~ 71%,且氧化铁的质量分数高达 97% 以上<sup>[8]</sup>。以表 3 所示的某精铁矿团为原料,其相应的 DRI 成分组成如表 4 所示。合成 DRI 系统参照国外实际生产竖炉的炉顶煤气利用率( $\eta = 35\% \sim 40\%$ )<sup>[9]</sup>,本文中取炉顶煤气的利用率为 39%。

表 3 矿石的成分组成(质量分数) %

TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	P
67.4	0.32	2.1	0.97	0.5	0.05	0.002	0.002

表 4 DRI 的成分组成(质量分数) %

Fe	MFe	$\eta$ Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	P	C
92.5	86	93	2.3	0.54	0.39	0.03	0.002	0.023	0.2

### 1.2.4 甲醇合成系统

目前世界上绝大多数的甲醇都来源于天然气重整合成转化而成<sup>[10]</sup>。而我国天然气资源相对贫乏,因此煤制甲醇被广泛应用于工业生产过程中。本文中选择传统 Lurgi 列管式气相甲醇合成工艺<sup>[11]</sup>,此工艺由合成气制备系统和甲醇生产系统组成。合成气制备系统主要包括空分制氧、粉煤气化、水煤气变换、脱硫脱碳等。甲醇生产系统主要由甲醇合成和粗甲醇精馏组成。甲醇合成合成气的最佳氢碳比( $H_2/CO$ )要求在 2.0 ~ 2.4,与 HYL 直接还原铁工艺对合成气要求相当。工业生产过程中通常将弛放气排空,这样处理一方面使得系统一部分能量损失(这部分能量占系统能量输入的 2% 左右),另一方面也造成环境的污染。

## 2 系统评价指标

选择最佳的评价方法对多联产工艺计算具有重要意义,为此许多学者在这方面做了大量研究。从环境、经济、热力学等不同角度出发得出一系列评价指标<sup>[12-14]</sup>。还有人考虑综合因素,提出新的综合性指标作为评价准则<sup>[15]</sup>。该多联产系统是化工和冶金系统的集成,DRI 和甲醇的生产,都是化学能向化学能转化的过程,能量品位相同。从能量利用角度,选用相对节能率<sup>[16]</sup>作为系统的评价准则。

$$\eta_e = [(P \cdot Q_M + W \cdot Q_D) - Q_C] / Q_C \quad (1)$$

式中, $\eta_e$  为 DRI-甲醇联产系统的相对节能率; $P$  为 DRI-甲醇联产系统甲醇的产量,t; $Q_M$  为甲醇分产系统的甲醇合成能耗,GJ/t; $W$  为 DRI-甲醇联产系统 DRI 的产量,t; $Q_D$  为 DRI 分产系统的 DRI 生产能

耗,GJ/t; $Q_C$  为 DRI-甲醇联产系统输入的总能量值,GJ。

## 3 系统性能结果分析

### 3.1 系统物料和能量衡算

通过模拟计算分别得到分产和联产系统的主要能源消耗结果,以及 DRI-甲醇联产和分产的性能比较如表 5 所示。

表 5 直接还原铁—甲醇联产系统和分产系统性能比较

项目	甲醇分产	DRI 分产	多联产
输入			
煤/(t·h <sup>-1</sup> )	17.74	16.38	31.25
氧气/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	7356	6428.60	12258
天然气/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		125.22	125.22
压缩空气/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		14800	11648
公用工程			
电/kW	1012.30	905.65	1575.8
水/(t·h <sup>-1</sup> )	2814.49	307.90	984.12
0.6 MPa 蒸汽(158.9℃)/(t·h <sup>-1</sup> )	13.6	3.14	14.6
1.5 MPa 蒸汽(198.3℃)/(t·h <sup>-1</sup> )	1.35	1.624	2.55
冷量/MJ	2040.26	3092.6	3840
输出			
5.2 MPa 蒸汽(270℃)/(t·h <sup>-1</sup> )	8.52	7.84	14.95
3.5 MPa 蒸汽(198℃)/(t·h <sup>-1</sup> )	8.26	1.36	11.51
甲醇输出/(t·h <sup>-1</sup> )	11.92		11.92
DRI 输出/(t·h <sup>-1</sup> )		31.30	31.3
吨产品能耗/(GJ·t <sup>-1</sup> )	39.8	11.77	
热效率/%	50.1	68.37	60.33
相对节能率/%			7.93

与甲醇合成不同,DRI 生产需要额外输入压缩空气和天然气,分别用于加热还原气和渗碳反应。因为尾气中有 1% 高热值的甲醇和少量乙醇,所以分产系统压缩空气消耗量比联产多 3 152 m<sup>3</sup>/h。联产系统产生的炉顶气没有循环利用,因此耗电量较分产少 342.15 kW。联产与分产有同样质量的 DRI 和甲醇产品输出的情况下,通过能量衡算得到分产甲醇的能耗为 39.8 GJ/t,分产 DRI 的能耗为 11.7 GJ/t。根据式(1)计算出 DRI-甲醇联产系统的热效率为 60.33%,相对节能率达到 7.93%。

### 3.2 能量在系统中的转移和分布

为了进一步分析多联产系统的改善原因,设系

统输入煤的能量为 100, 分别分析了分产系统和 DRI-甲醇多联产统中能量的分布和转移情况, 如图 2~图 4 所示。



图2 直接还原系统能量的转移



图3 甲醇合成系统能量的转移

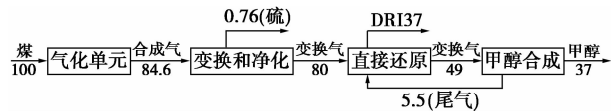


图4 DRI-甲醇联产系统能量的转移

从系统的能量转移和分布图可以看出, 单产甲醇系统在水煤气变换和净化单元能耗比其他系统小 0.2%。这是由于单产甲醇系统合成气的  $H_2/CO$  比为 2, 而其他系统  $H_2/CO$  比为 2.6。单产 DRI 系统 5.5% 的新鲜还原气作为燃料燃烧, 而 DRI-甲醇联产系统将产生的 5.5% 尾气(其中有少量的甲醇和乙醇)作为加热燃料。和单产比较, 一方面系统节省了 2% 的能量, 同时回收了弛放气和尾气有益于环境保护, 另一方面直接还原铁的新鲜还原气量增加, 这部分还原气 39% (系统总能量的 2.15%) 参与直接还原反应, DRI 产量增加。其余 60% (系统总能量的 3.35%) 通入甲醇合成系统, 但由于联产系统甲醇合成未反应气的循环倍率为 0.97 (分产为 0.99), 因此甲醇产量几乎不变。从图 4 还可以看出, 联产产品能量占系统总能量的 74%, 而分产产品加和占分产系统总能的 65%。为了简洁地说明问题, 图 4 只是简单地分析了输入原料煤能在系统中的分布和转移, 实际能量的分布和转移还应考虑水、电、汽等其他输入和输出系统的能量(表 5)。

## 4 结论

(1) 甲醇-直接还原铁联产系统优于分产系统。

(2) 甲醇-直接还原铁联产系统相比分产系统节省了 7.93% 的能量, 系统效率达到 60.33%。其中甲醇精馏产生的少量可燃气和弛放气的利用是改善多联产系统性能的主要措施。

(3) 直接还原工艺采用炉顶气无循环流程, 一

方面使得工艺简单、可操作性强, 另一方面新鲜还原气成分稳定, 可以确保直接还原铁的生产质量。

(4) 利用弛放气和尾气作为直接还原铁单元的燃烧气, 可以使整个系统形成闭环系统, 实现节能、环保双重效益。

## 参考文献

- [1] 庞建明, 郭培民. 煤基直接还原炼铁技术分析[J]. 鞍钢技术, 2011, (3): 1-7.
- [2] 倪维斗, 李政, 薛元. 以煤气化为核心的多联产能源系统—资源/能源/环境整体优化与可持续发展[J]. 中国科学工程, 2002, 2(8): 59-67.
- [3] 周渝生, 钱晖, 齐源洪. 煤气化生产直接还原铁的联合生产工艺方案[J]. 钢铁, 2012, 47(11): 27-31.
- [4] 麻林巍, 倪维斗, 李政, 等. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统分析(下)[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 603-608.
- [5] 杨显军, 张成. 胜利褐煤热解提质-气化特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(5): 453-459.
- [6] 于戈文, 李永旺. 不同工艺路线 FT 合成油-电多联产模拟计算[J]. 过程工程学报, 2010, 10(5): 964-970.
- [7] 贺永德. 现代煤化工技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [8] 彭宇慧, 代正华. 气流床粉煤气化技术在直接还原铁生产过程中的应用[J]. 化工进展, 2009, 28(3): 528-533.
- [9] Direct reduction of iron ore—bibliographical survey[M]. London: The Metals Society, 1967: 127.
- [10] 李洪强, 洪慧. 生物质气化-天然气重整-甲醇动力多联产系统特性分析[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4): 541-545.
- [11] 易凌云. 铁矿球团  $CO-H_2$  混合气体气基直接还原基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [12] Ng K S, Sadhukhan J. Process integration and economic analysis of bio-oil platform for the production of methanol and combined heat and power[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(3): 1153-1169.
- [13] Kim J, Park M, Kim C. Performance improvement of integrated coal gasification combined cycle by a new approach in exergy analysis[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2001, 18(1): 94-100.
- [14] 王灵梅, 倪维斗, 李政. 基于能值的不同煤基发电系统的可持续性评价[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 98-102.
- [15] Lin gao, Hongguang Jin. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production[C]. Proceedings of ECOS 2002: Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems, Berlin, 2002: 137-144.
- [16] 李召召, 代正华. IGCC-甲醇多联产系统节能分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 20(32): 1-7. ■