

Gasification for Synthetic Fuel Production

Fundamentals, Processes and Applications

合成燃料生产气化法的原理、工艺及应用

[西] 拉斐尔·卢克 (Rafael Luque) ,
[美] 詹姆斯·G·斯贝特 (James G. Speight) 编
焦 阳 译



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

合成燃料生产气化法的 原理、工艺及应用

Gasification for Synthetic Fuel Production
Fundamentals, Processes and Applications

[西]拉斐尔·卢克(Rafael Luque)

[美]詹姆斯·G·斯贝特(James G. Speight)

编

焦阳 译



中国石化出版社

著作权合同登记 图字 01-2017-7932

This edition of Gasification for Synthetic Fuel Production by JR Luque, J Speight is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.

中文版权为中国石化出版社所有。版权所有，不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

合成燃料生产气化法的原理、工艺及应用 / (西) 拉斐尔·卢克 (Rafael Luque), (美) 詹姆斯·G. 斯贝特 (James G. Speight) 编; 焦阳译. —北京: 中国石化出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5114-4904-7

I. ①合… II. ①拉… ②詹… ③焦… III. ①合成燃料-生产工艺 IV. ①TQ517.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 123586 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区吉市口路 9 号
邮编: 100020 电话: (010) 59964500

发行部电话: (010) 59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

710×1000 毫米 16 开本 18.75 印张 331 千字
2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷
定价: 95.00 元

译者序

《合成燃料生产气化法的原理、工艺及应用》原书由知名学者 Rafael Luque 与 James G. Speight 编写，汇集了煤或煤的衍生物(如煤制成的煤焦)气化的相关研究和实践成果，系统介绍了液体燃料生产气化法的发展历程、基本原理及工程实践等方面的内容。

按照本文的叙述，气化工艺根据反应床的类型分为不同类别，在接受(和使用)黏结煤的能力方面有所不同。通常气化工艺可按照反应器(床)的结构分为固定床、流化床、液流床及熔盐四类。气化工艺所用原料可分为两大类。化石原料包括煤和炼制残油。可再生原料有木质纤维生物质、城市废弃物、生物固体以及黑液。

随着石油资源供应的减少，尤其是发生天然气短缺的领域，利用其他含碳原料产气的需要随之增加。天然气的成本预计将继续增长，煤气化技术因此具备了经济可行的竞争力。相关研究在小试和中试规模的进展，推动世纪末新工艺技术的发展，从而加速了煤气化的工业化。气化法生产合成液体燃料的经济、环境、政策可持续性评估的结论是一代生物燃料在减少温室气体排放方面的局限性、粮食与能源作物用地之间日益加剧的争地问题以及当前的经济危机压低了媒体期望，这一切伴随着一种紧迫感，迫使人们寻找新的解决方案和新的投资机会继续可持续发展路线。新方案是更多使用二代生物燃料，其对土地和能源输入要求没有一代生物燃料高，更有利于温室气体减排。

在气化法合成液体燃料生产方面。随着能源需求的不断增加，对传统燃料的未来可持续性也越来越关注。人们越来越需要找到可替代燃料，例如合成燃料。传统交通运输燃料是由原油精炼加工而成，但是合成燃料的生产可以使用各种各样化石燃料和生物质材料，预计在未来几年不断增加供应。此外，许多国家可能会使用煤、天然气、油页岩、生产合成燃料的非食品农作物以及含碳废料

作为替代材料，不再需要原油。合成燃料易于配合交通运输体系，它可以直接应用于汽车引擎，几乎等同于原油精炼的燃料产品。这使其有别于乙醇等现行市场上的生物燃料，它们必须与气体相混合，或要求特殊的引擎才能使用。

在合成燃料生产的重烃气化技术，炼油工业的未来将主要取决于生产高质量产品的工艺。因此，未来的炼油厂将有一个专门用于将煤和生物质转化为费-托烃的气化部分，甚至可以将富含油页岩添加到气化器原料中。许多炼油厂已经拥有气化能力，但在后续的二三十年间，这一趋势将会上升，几乎所有的炼油厂都认识到需要建造一个气化段来处理残渣和其他各种原料。生物质、煤中的液体和油页岩中的液体将变得越来越重要，这些原料很可能被送到炼油厂或在遥远的地方加工，然后与炼油厂原料混合，但最重要的是这种原料必须与炼油原料相容且不造成污染。

生物质气化用于合成液体燃料的生产。分阶段生物质气化是生物质气化具有高焦炭转化率和低焦油含量的最佳选择，并且三级生物质气化器具有接近98%的碳转化效率。另一方面，吸附增强蒸汽气化是为生物质生产高浓度 H_2 而开发的新型一步转化技术。随着CaO或CaO基催化剂的添加， H_2 浓度可以从40%增加到约75%或更高。生物质气化已显示出独特的优势。与合成气相比，气体产品中的微粒、碳氢化合物和碱性化合物等问题仍然存在一些挑战。关于气化过程需要进行大量的研究，学术界和工业界必须不断开发和展示新技术，以创造大规模的现实应用。

纵观全书，最大的特点是理论结合实际，系统性强，作为一本适于从事煤或煤的衍生物(如煤制成的煤焦)气化的科技人员、装置管理与操作人员阅读的“小百科全书”，必将受到广大读者的欢迎。

焦阳

2018年8月20日

目 录

第一部分 原 理

第 1 章 液体燃料生产气化法概述	(3)
1.1 前言	(3)
1.2 气化工艺	(4)
1.3 气化工艺原料	(5)
1.4 发电用气化工艺	(11)
1.5 用于合成燃料生产的气化工艺	(16)
1.6 未来发展趋势	(20)
参考文献	(21)
第 2 章 液体燃料生产专用气化炉类型：设计及技术	(26)
2.1 前言	(26)
2.2 气化炉类型	(27)
2.3 气化产物	(34)
2.4 反应器设计：化学角度	(37)
2.5 反应器设计：物理角度	(40)
2.6 气化机理	(43)
参考文献	(47)
第 3 章 气化法生产合成液体燃料的原料制备	(50)
3.1 前言	(50)
3.3 原料适用性和应用挑战	(53)
3.4 后续加工前期准备技术	(56)
3.5 气化原料的优点和局限	(60)
致谢	(61)
参考文献	(61)
第 4 章 气化法生产合成液体燃料的可持续性评估：经济、环境、 政策问题	(65)
4.1 前言	(65)
4.2 环境和能源问题	(66)

4.3 合成生物燃油和燃气的经济评估	(72)
4.4 可持续性评估在国际生物燃料政策支持中的作用	(83)
4.5 结论	(85)
4.6 未来发展趋势	(86)
参考文献	(87)

第二部分 气化法液态燃料合成工艺

第 5 章 气化法液态燃料合成反应动力学	(95)
5.1 前言	(95)
5.2 气化化学基础	(96)
5.3 化学工艺	(100)
5.4 结论	(106)
参考文献	(106)
第 6 章 合成气和氢气气化法生产工艺	(109)
6.1 前言	(109)
6.2 合成气生产	(110)
6.3 氢气生产	(118)
6.4 气化产物：组成与质量	(123)
6.5 优点与存在的问题	(128)
参考文献	(130)
第 7 章 气化法合成液体燃料生产	(135)
7.1 前言	(135)
7.2 费托工艺	(136)
7.3 Sabatier-Senderens 工艺	(142)
7.4 热、催化与加氢裂化工艺	(145)
7.5 产品质量	(154)
7.6 结论	(155)
参考文献	(157)
第 8 章 气化工艺燃料评价：煤分析与质量控制	(160)
8.1 前言	(160)
8.2 取样	(161)
8.3 工业分析	(162)
8.4 热值	(165)
8.5 元素分析	(166)

8.6 物理性能	(167)
8.7 力学性能	(169)
8.8 热性能	(171)
8.9 实时质量控制分析	(174)
8.10 优势与局限性	(175)
参考文献	(176)

第三部分 应用

第9章 合成液体燃料的煤气化工艺	(185)
9.1 前言	(185)
9.2 煤的种类和性质	(185)
9.3 气体产品	(187)
9.4 产品和产品质量	(191)
9.5 化学品的生产	(195)
9.6 优点和局限性	(198)
参考文献	(199)
第10章 用于合成燃料生产的重烃气化技术	(203)
10.1 前言	(203)
10.2 重质原料	(204)
10.3 合成气生产	(209)
10.4 产出产品	(214)
10.5 结论和未来趋势	(215)
参考文献	(217)
第11章 生物质气化用于合成液体燃料的生产	(220)
11.1 前言	(220)
11.2 生物质资源特性	(222)
11.3 生物质气化	(225)
11.4 生物质气化特性	(227)
11.5 生物质气化炉	(232)
11.6 焦油的形成和裂解	(234)
11.7 焦炭气化	(237)
11.8 生物质气化新技术	(239)
11.9 生物质气化的数学模拟	(243)
11.10 结论	(245)

致谢	(246)
参考文献	(246)
第 12 章 用于合成液体燃料生产的废物气化	(253)
12.1 前言	(253)
12.2 废物类型	(254)
12.3 原料性质和工厂安全	(258)
12.4 燃料生产	(259)
12.5 过程产物	(266)
12.6 优点和局限	(271)
参考文献	(272)
第 13 章 气化过程在合成液体燃料生产上的应用：过去，现在 与未来	(276)
13.1 前言	(276)
13.2 应用和产品	(277)
13.3 气化系统的环境效益	(283)
13.4 气化工艺发展方向	(284)
13.5 结论	(289)
参考文献	(290)

第一部分

原 理

第 1 章 液体燃料生产气化法概述

R. Luque¹, J. G. Speight²

(1. University of Colorado, Colorado, Spain;

2. CD&W Inc., Laramie, WY, USA)

1.1 前言

气化法是有有机(含碳)原料在高温($>700^{\circ}\text{C}$)条件下与定量氧气和/或蒸气发生非燃烧反应转化为一氧化碳、二氧化碳以及氢气的工艺过程(Lee, Speight, & Loyalka, 2007; Speight, 2008, 2013)。反应得到的气体混合物(合成气)本身就是一种燃料。生物质等非化石能源类含碳原料经过气化工艺过程生成气体产物,然后通过燃烧进行发电,被认为是可再生能源(Speight, 2008)。

气化法的优势在于,使用合成气(syngas)比直接燃烧原燃料的效率要高,因为合成气可以:①在更高的温度下燃烧;②以燃料电池的形式使用;③生成甲醇和氢气;④通过费托(FT)工艺过程转化为一系列合成液体燃料,适用于汽油或柴油发动机。气化工艺可以使用那些在其他情况下会废弃的含碳原料(比如生物可降解垃圾)。

此外,气化法的高温工艺过程中金属氯化物和钾盐等腐蚀性灰分元素的生成,避免了问题燃料的产生,保证了清洁气体的生产。

多年来,煤炭一直是气化装置的主要原料。但由于对环境污染物的关注以及一些地区的煤炭短缺问题(美国除外),人们开始推动在气化工艺中使用非煤原料。尽管如此,目前乃至今后几十年、甚至到 22 世纪,煤炭都仍将是气化工艺的主要原料来源(Speight, 2013)。

相比于使用标准粉煤燃烧的设施,煤气化企业更为清洁,更少产生会导致雾霾和酸雨的硫和氮化物。由于这一原因,气化工艺在使用相对价格低廉、来源更为广泛的煤炭资源时更具吸引力,同时还可以降低对环境的影响。实际上,市场对煤气化技术的关注快速增长,反映出该技术集发电市场上的两大革新于一身:①成熟的气化技术;②与其他煤基体系相比,整体煤气化联

合循环(IGCC)发电厂具备超低排放量,尤其是气体排放量,对温室气体的控制费用也更低。煤发电的主要竞争对手——天然气发电的成本波动问题,也在一定程度上推动了煤气化的发展。

另外,气化工艺可最大限度地利用各种原料(煤、生物质、石油渣、其他含碳废弃物)。因此,明智的发电企业会考虑使用气化工艺将煤转化为气体。

液体燃料包括汽油、柴油、石脑油、航空燃油,一般都是通过原油炼制所生产的(Speight, 2014)。由于直馏工艺的应用,原油是生产液体燃料的最佳原料。不过随着石油价格的波动和上涨,煤制油和生物制油工艺开始成为生产液体燃料的替代路线。两种工艺的原料都可转化为合成气(一氧化碳和氢气的混合物),然后通过费托工艺再转化为液体产物的混合物。经过费托合成工艺后生成的液体燃料,采用现有石油炼制技术进行质量升级,生成汽油、石脑油、柴油和航空燃油(Chadeesingh, 2011; Dry, 1976; Speight, 2014)。

1.2 气化工艺

根据反应床的类型,气化工艺可分为不同类别,而在接受(和使用)黏结煤的能力方面有所不同。通常,气化工艺可按照反应器(床)的结构分为四类:固定床、流化床、液流床、熔盐体系。

在固定床工艺中,煤通过格栅支撑进行反应。燃烧气(蒸汽、空气、氧气等)穿过煤,生成高温气体产物,然后从反应器顶部排出。反应热量来自于内部或外部热源,但黏结煤在未改进过的固定床反应器中无法使用。

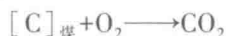
流化床中使用的是细颗粒煤,当气体自下向上流经反应床时,床层呈现类似液体的特征。气体流经煤产生湍流,提升分离煤颗粒,床层膨胀,煤层表面积扩大,从而促进反应。但这类反应床处理黏结煤的能力有限。

在液流床中,在进入反应器前将煤的微细颗粒吹入蒸气中,然后悬浮在气相中的煤颗粒发生燃烧反应。黏结煤和非黏结煤均可适用于液流床。

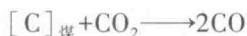
气化工艺的第四种类别是熔盐体系。该反应体系采用熔盐槽用于煤转化(Cover, Schreiner, & Skaperdas, 1973; Howard-Smith & Werner, 1976; Speight, 2013)。

煤地下(或原位)气化的目标是在空气和氧气(或氧气和蒸汽)作用下煤层燃烧生成可燃气。这样一来,一度被认为是无法接触、无法作业、无开采经济价值的煤层就具备了开采性。此外,还可以减少和消除因条带开采以及其带来的环境问题,包括弃土堆、矿山酸性排水以及使用高灰煤所带来的问题。

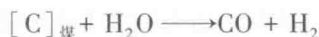
地下气化工艺的原理与地上煤气化工艺基本相同。工艺包括开采以及之后的两个钻孔连接，以便于气体在两钻孔之间的输送(King & Magee, 1979)。在其中一个钻孔(注入井)底部点燃，然后通过不断注入空气保持燃烧。在初始反应区(燃烧区)，氧气(空气)与煤发生反应生成二氧化碳：



二氧化碳与煤(部分脱挥)沿着煤层(还原区)进一步反应生成一氧化碳：



此外，在频繁产生的高温条件下，随氧气注入的湿气或煤层内的水分也可与煤发生反应，生成一氧化碳和氢气：



反应的气体产物的特性和组成各不相同，但一般都属于低热(低热值)能源，其热值为125~175Btu/ft³不等(King & Magee, 1979)。

1.3 气化工艺原料

气化工艺所使用的原料范围很广，但反应器必须根据原料性质和反应中的特性进行选择。

1.3.1 煤

煤是一种在沼泽生态系统中形成的化石燃料，在该生态系统中，植物遗骸逃脱了氧化作用以及水和污泥的生物降解作用得以保存下来。煤是一种由古代植物形成的可燃有机沉积岩(主要组成包括碳、氢、氧，以及其他微量元素如硫)，在其他岩石地层间发生固化形成煤层。硬煤层由于成熟度更高，可认为是有机变质岩(如无烟煤)。

煤是全球发电行业最大的单一燃料来源，同时也是二氧化碳排放的最大来源，而二氧化碳一直被认为是全球变暖的主要元凶。煤是以连续地层(或称积煤层)的形式存在，被砂岩和页岩层夹在中间，以采煤的方式从地下开采出来——包括地下煤层(地下开采)和露天开采。

煤的供应很充足；以目前开采和消费的速度，全球煤炭的总储量估计至少有155年的储量/开采比。然而，与所有对资源寿命的预测一样，这一煤炭的使用年限是建立在假定剩余的煤炭以目前的消耗速度使用的基础上的。而且，决定煤炭开采速度的技术发展也会影响煤炭的使用年限。而最重要的是，煤是一种化石燃料，也是一种会加速全球变暖的非清洁能源。实际上，如果认为电力是一种清洁能源，则要考虑到主要的发电方式是什么——美国几乎

50%的电力是来自煤电(美国环保署 EIA, 2007; Speight, 2013)。

煤的形式或类型多种多样(Speight, 2013)。源材料的特性差异以及煤化作用过程中的局地或地区差异导致植物发生不同进化。因此,存在不同的分类体系对各种煤进行定义。煤前驱体随着时间(地质过程随着时间发展作用增强)转化分为以下类型:

① 褐煤:是等级最低的煤,仅用于蒸汽发电的燃料。自从铁器时代以来,煤玉是褐煤的一种致密形式,可抛光后作为装饰使用。

② 次烟煤:其特性与褐煤和烟煤的性质相同,主要用于蒸汽发电。

③ 烟煤:属致密煤,通常为黑色,偶为深褐色,通常带有轮廓分明的易碎暗色物质,主要用于蒸汽发电,还大量用于生产制造焦炭。

④ 无烟煤:硬度高,有光泽,呈黑色,主要用于民用和商业取暖,是等级最高的煤。

从化学性质来看,煤是一种贫氢类碳氢化合物,其氢/碳原子比约为 0.8,而相应的,石油类碳氢化合物的氢/碳原子比接近 2,而甲烷(CH_4)的氢/碳原子比为 4。由于这一原因,任何将煤转化为替代燃料的工艺都必须加氢或对原煤中的氢进行重新分配,生成富氢产物和焦炭(Speight, 2013)。

煤的化学组成根据其近似和最终(元素)分析而定(Speight, 2013)。近似分析的参数包括水分、挥发物质、灰分以及固定碳。元素或最终分析包括对煤中的碳、氢、氮、硫、氧的定量测定。此外还确定了煤的特定物理和机械特性以及炭化特性。

通过煤的气化反应产生气体混合物,得到一氧化碳和氢气。除了一氧化碳和氢气之外,根据反应条件的不同,还可以生成甲烷和其他碳氢化合物。可在原位或加工装置中实现气化反应。在地下煤床的可控不完全燃烧条件下,加入空气和蒸汽实现原位气化反应。气体被抽出然后燃烧,以用于制热和发电,或者在间接气化反应中作为合成气或用于化学品生产。

通过将煤转化为一氧化碳、氢气、二氧化碳、甲烷的合成气,可实现从煤制柴油或其他燃料。合成气再通过费托合成工艺发生反应,生成碳氢化合物,然后通过炼制生成液体燃料。该工艺中通过提高煤制高品质燃料的产量(同时降低生产成本),可有助于降低对日益昂贵和匮乏的石油资源的依赖。

煤是一种储量丰富的自然资源,其燃烧或气化产品均为造成温室效应的有毒污染气体。科学家正致力于通过研发捕获污染物(汞、硫、砷以及其他有害气体)的吸附剂,在减少排放气体的同时,尽可能提高净化工艺的热效率。

因此气化工艺是最为清洁和多样的方法,可将煤中的能量转变为电力、氢气以及其他能源。实际上,将煤转化为合成气并非是个新概念,其基本技

术可回溯到二战时期。

1.3.2 生物质

生物质可被视为任何一种具备碳平衡原则的可再生原料(在植物生长过程中,植物利用太阳能从空气中吸收的碳与释放到空气中的碳相等)。

在生活中很容易找到可用于生产生物质衍生燃料的原材料,其来源十分广泛,形式多样(Rajvanshi, 1986)。生物质的基本来源包括:①木材,包括树皮、原木、锯木屑、木片、木质颗粒、型煤;②高产的能量作物,如小麦,专门培育用于能源应用;③农作物及残渣(如稻草);④工业废弃物,如木浆和纸浆。从加工角度来说,生物质的一个简单形式,如未被处理和未完全使用的木材,可以转化为木质颗粒和木片等多种物理形式,用于生物质锅炉和火炉。

生物质材料来源广泛,可根据其特点生产多种产品(Balat, 2011; Demirbas, 2011; Ramroop Singh, 2011; Speight, 2011a)。此外,不同种类生物质的热值变化很大,在进行转化工艺设计时必须考虑这一点(Jenkins & Ebeling, 1985)。

热转化工艺将生物质转化为其他化学形式的主要机理是使用热量。燃烧工艺的基本替代方法有烘烤、热裂解和气化,从原理上根据工艺过程中发生的化学反应的反应深度进行分类(反应深度主要通过氧气量和转化温度进行控制)(Speight, 2011a)。

通过生物质燃烧产生的能量(称为放热能)的方法,尤其适合薪材生长快速的国家(如热带国家)使用。包括水热提质和加氢处理等其他应用较少、实验性更强或有专利的热工艺也有一定优势。其中一些工艺经过研发,可将高含水量的生物质(如含水污泥)转化为更有利于人们实际应用的形式。

在热转换的一些应用中,综合利用了热电联产和混燃。在一座典型的生物质专用发电厂中,其能效值在7%~27%之间。而生物质与煤混燃的效率则接近煤燃烧器的能效(30%~40%)(Baxter, 2005; Liu, Larson, Williams, Kreutz, & Guo, 2011)。

多种形式的生物质中均含有大量的水(或碳水化合物和糖类)和矿物质,二者都影响气化工艺的经济性和可行性。生物质含水量高会降低气化炉的温度,从而降低气化炉的效率。许多生物质气化技术因此需要干燥生物质,在原料进入气化炉之前需要降低生物质的含水量。此外,生物质的尺寸不一,在许多生物质气化系统中,生物质必须以相同的尺寸或形状进行处理,才能以相同的进料速度进入气化炉,从而增加气化效率。

木质颗粒、煤矸石、农作物秸秆等生物质,以及高能量作物,包括柳枝

稷和纸浆等废弃物，也可用作生产生物乙醇和合成柴油。生物质首先被气化生成合成气，然后通过催化工艺转化为前面提到的生物乙醇等下游产品。生物质也可与传统原料煤混合或单独作为原料发电。

绝大多数生物质气化工艺使用空气而不是氧气用于气化反应(氧气主要用于大型工业和电力气化企业)。采用氧气的气化炉需要气体分离系统(ASU)提供气态/液态氧气，因此，如果生物质气化企业的规模较小，其性价比会比较低。而空气气化炉则采用空气中的氧气用于气化过程。

总的来说，与发电、化工、化肥、炼制行业中的煤或石油焦气化企业相比，生物质气化企业规模相对较小。因此，生物质气化企业的成本较低，环保压力更小。一家大的工业气化企业可能占地 150 英亩(0.6 平方公里)，日处理率为 2500~15000t 煤或石油焦，而小型生物质气化企业的日处理量为 25~200t，占地小于 10 英亩(0.04 平方公里)。

最后，尽管生物质可解决全球气化变化问题，但必须要仔细考虑生物质作为能源原料存在的优势和劣势：

优势：①理论上永远是永远不会枯竭的燃料来源；②植物不直接燃烧用于发电(而用于发酵、热解等)对环境的影响最小；③由生物质制成的酒精等燃料高效、可行，燃烧相对清洁；④在世界各地均可获得。

劣势：①对全球气候变化影响巨大，直接燃烧污染严重；②从生物质生产和转化为酒精等燃料的技术角度来看，成本较高；③对生物质生产的生命周期的评估需考虑到能源输入和输出，但在小规模运行时更有可能是能源净损失(种植植物必须输入能源)。

同样，在考虑全球气候变化问题时，必须认识到当前地球处于间冰期，会发生气候变暖现象。变暖的程度未知，毕竟没有上次间冰期时的气温变化记录，基于此，人类对全球气候变化的影响不可能进行精确测算。

1.3.3 石油渣

气化法在炼厂中是唯一一种产生零残渣的技术。所有其他的转化技术(包括热裂化、催化裂化、焦化、脱沥青、加氢等)都只能减少残渣量，随着转化程度的增加，石油渣更加劣质化、复杂化。

气化法可处理任何一种炼油残留，包括石油焦、罐底残油和炼油污泥；气化法还可生产一系列高附加值产品，包括电、蒸汽、氢气和各种合成气生产的化学品，如甲醇、氨、MTBE、TAME、乙酸、甲醛(Speight, 2008; 第 7 章)。气化法的环保性无与伦比，其他处理低价值炼油残渣技术的排放水平均远高于气化法(Speight, 2014)。