



科爱传播  
KE AI COMMUNICATIONS

新能源技术应用系列

· 导读版 ·

# 生物质气化与热解 实用设计与理论

**Biomass Gasification and Pyrolysis**  
**Practical Design and Theory**

Prabir Basu



原版引进



科学出版社

# **Biomass Gasification and Pyrolysis**

Practical Design and Theory

## **生物质气化与热解**

实用设计与理论

Prabir Basu

**科学出版社**

北京

图字:01-2011-3201 号

This is a annotated version of

**Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**

by Prabir Basu

Copyright 2010, Elsevier Inc.

ISBN: 9780123749888

Authorized English language reprint edition published by the Propretor.

Printed in China by Science Press under special arrangment with Elsevier(Singapore)Pte Ltd. This edition if authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Maa SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violoaion of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书英文影印版由 Elsevier(Singapore)Pte Ltd. 授权科学出版社在中国大陆境内独家发行。本版权在中国境内(不包括香港特别行政区以及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

#### 图书在版编目(CIP)数据

生物质气化与热解:实用设计与理论=Biomass Gasification and Pyrolysis:Practical Design and Theory:英文/(加)巴苏(Basu,P.)编著. —北京:科学出版社,2011  
ISBN 978-7-03-031236-5

I. ①生… II. ①巴… III. ①生物能源-气化-英文 IV. ①TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 101062 号

责任编辑:霍志国/责任印制:钱玉芬

封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:24 1/4

印数:1—1 500 字数:488 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 导 读

近年来虽然由于受到经济快速发展、化石能源价格波动、全球气候变化等因素的推动，世界各国在生物质能源转化方面投入了很多努力，但仅有极少数的示范装置真正投入了运行，所采用的技术路线和原料也多种多样。相比于煤、油、气等传统化石资源的技术发展，生物质的转化还处于初级阶段，还很不成熟且尚未形成规模，其主要困难包括原料能量密度低、物性多样复杂、收集储运困难、焦油问题、规模小、转化效率低、经济性不好、产品标准缺乏等。

相比传统煤气化，生物质气化技术目前还很不成熟，尚存在过程成本高、能耗高、转化率低、气体中杂质成分复杂、处理量低等技术问题。另外，由于在成本、排放、效率、可用率以及实际操作经验等方面基本没有可靠的数据，故用户缺乏足够的信心。另外，生物质气化技术必须完整地集成到生物质能源转化系统中并且确实证明其经济可行性才能够大规模进入能源市场。与欧美国家相比，目前我国生物质气化还是以中、小规模和固定床、低热值气化为重，气化技术商业化的主要技术障碍包括二次污染、气化炉可靠性以及废水处理问题。流化床以及气流床生物质气化炉比固定床生物质气化炉具有更好的经济性，也更容易放大，应该成为今后生物质气化研究的主要方向。

与生物质气化技术相似，目前生物质热解技术也处于产业化尝试阶段，尚未完全成熟。生物质快速热解液化技术面临的主要问题包括成本高、产品稳定性差、应用测试数据不足、产品标准缺乏、与已有传统液体燃料无法相融、需要专门的处理设备等，因此生物油还无法大规模推广应用。今后的研究重点是如何提高生物油的品质以及提高热解设备长周期连续运转的稳定性。

值得注意的是，生物质可以通过另外一种热解方式，即低温烘焙改变其原料性质，提高能量密度，降低储运成本，扩大经济利用规模，从而有可能改善生物质能源转化系统技术经济性能，使之能够在能源市场占有一席之地。

本书是国际上最新一部全面介绍生物质气化和热解的专著，全书由9个章节和3个附录组成，其中包含了对设计气化炉及其组件极有参考价值的大量图表。

第1章简单介绍了（生物质）气化的历史、技术发展推动力、气化产品等，同时简要叙述了有关气化过程的化学反应。作者将气化历史划分为4个阶段，从中读者能够看到技术的发展与社会、经济以及政治发展的密切关系，体会到需求是技术发展的第一推动力。生物质作为能源最大的优势在于其可再生性。生物质资源量很大，尽管只有5%可以用来生产能源，但已经可以满足全球26%的能

源消耗需求。以生物质为原料可以生产气、液、固 3 种形态的多种产品，这些产品可划分为化学品、热、电和交通燃料 4 大类。生物质的转化有两条最为重要的路线，即生物化学转化（如发酵）和热化学转化（热解和气化）。在热化学转化中，首先要搞清楚有关燃烧、热解、气化以及液化等过程的基本概念及其大体的实现方式。生物质转化利用的推动力来自基于其本身原料特点的几个方面，包括其可再生性、环境效益和社会政治效益。气化过程在商业方面的吸引力主要来自它能够将废弃的或低价值的燃料转化成高附加值的能源产品或化学品。本章最后简要总结了气化过程所涉及的各种相关化学反应。

第 2 章阐述了直接与生物质气化和热解相关的生物质的各种性质。首先，什么是生物质？人们会发现很难下一个能够被广泛接受的定义。生物质的形成可以用一个简单的化学反应方程式来描述，其最重要的因素包括活体植物、太阳辐射可见光、二氧化碳、叶绿素和水分。生物质的种类大体包括木质纤维生物质、庄稼和蔬菜、废弃物等。生物质的结构也非常复杂，其主要的组成成分包括萃取物、细胞壁和无机灰分。在燃料的分类方面，本书介绍了 3 种方法，即原子比图法、木质纤维组分比图法以及三角图法。这 3 种方法能够从不同的侧面反映燃料的组分特性，并能够对不同燃料进行一个横向比较，这对于如何选择合理的转化方式有重要的参考意义。生物质的性质主要是物理性质和化学性质两方面，物理性质方面主要介绍了各种密度的定义；化学性质方面主要阐述了热动力学性质，包括热传导性、生成热、着火温度等。生物质有关气化方面的性质重点需要掌握两类最为常用的分析测试数据，即元素分析和工业分析，需要搞清楚各个参数的确切含义，这是所有从事能源化工研究或工业实践的人必须要知道的基础知识。

第 3 章讨论了热解基础，同时包含了烘焙的内容，另外介绍了热解反应器的设计和烘焙过程的单元组件。本章一个最重要的概念是热解与气化的区别，即热解无需像气化那样从外部添加反应介质，而且其产品相对气化而言是多样的。19 世纪 40 年代中期，加拿大的物理学家发明了用加热煤的方法生产能够洁净燃烧、替代冒烟的鲸鱼油的液体燃料，称之为煤油（kerosene），在希腊文中的意思是蜡和油。有趣的是，这一发明大大减少了人们对鲸鱼的捕杀。本章的要点包括热解的概念、产品种类、实现方式、各种各样的热解反应器、其在设计过程中所需要考虑的各种因素等。本章的另外一大部分内容是关于烘焙的，实际上，烘焙属于条件相对温和、主要以固体为目标产品的一类热解过程，其主要功能是提高生物质能量密度、降低氧碳比和吸湿性，这对于生物质的高效大规模利用非常关键。

第 4 章的内容是关于焦油的生成及消除方面。焦油问题是生物质的气化和热解过程中都会遇到的问题，会在后续设备运行和环境方面造成不良影响。本章首先介绍了关于焦油的基础知识，包括焦油量的可接受限度、焦油生成的过程、焦

油的组成（包括一次焦油、二次焦油和三次焦油）。接着讨论了焦油的消除，包括焦油的在位消除和气化后二次消除。在位消除焦油的措施主要包括气化炉操作条件的改善、在流化床内添加催化剂或床料以及气化炉结构设计改良等，消除机理包括重整和裂解两类。在操作条件方面，需要考虑温度、压力、气化介质（如空气、水蒸气或氧/蒸汽混合）以及停留时间等因素。用于消除焦油的气化炉添加剂可考虑白云石、碱金属盐、商业镍催化剂以及半焦等。在气化炉设计方面，主要考虑适当的温度分布及气固接触方式，可选的气化炉形式包括上吸式、下吸式、流化床和气流床等，另外还可考虑通过加二次风、将热解段和气化段分离以及将初级热解气通过焦床层等设计来减少焦油量。在气化后二次消除方面，可选方式可分为物理法和裂解（催化裂解或热裂解）法两类。

第5章讨论了生物质气化理论和气化炉的模拟。气化炉的设计和运行需要对气化过程有深入的理解，同时要了解如何设计、如何进料以及操作参数对气化性能影响等。常用的气化介质主要包括氧气、水蒸气及空气。使用不同气化介质，产品气的组成和热值会有所不同。典型生物质气化过程包含以下几个步骤：（1）干燥；（2）热分解或热解；（3）一些气体、挥发物以及焦点部分燃烧；（4）分解产物的气化。这几个步骤涉及物料的不同物理化学变化：干燥是在生物质加热到 $100^{\circ}\text{C}$ 以上时，生物质内部松散结合的水分已不可逆地溢出，这个过程一直会持续到大约 $200^{\circ}\text{C}$ 。由于水电蒸发热很大，因此高水分含量的物料在能源利用时必须关注这部分能耗。热解过程先于气化过程发生，这个过程将生物质内部的大分子碳水化合物分解成相对小的、可凝结或不可凝结的气体分子。热解过程最重要的产物是焦油，会对气化在工业应用过程中造成很大困难。气化过程最重要的反应是焦的气化反应，具体包括焦与氧的反应、焦与二氧化碳的反应、焦与水的反应、焦与氢气的反应等，要注意这几个反应的速率处于不同量级。气化的另外一个重要反应是所谓水煤气变换反应，及一氧化碳与水反应生成二氧化碳和氢气，这个反应可以调节气化生成气体的组分。焦的燃烧，即焦与氧气反应，同时生成一氧化碳和二氧化碳，其比例取决于平衡温度，这个反应不仅提供其他气化反应所需热量，同时对产品气组分也有很重要的影响。另外，在气化过程中也可以通过添加一些催化剂加快反应速率。在反应器层面，气化反应还强烈受到气固接触方式的影响，不同接触方式会造成不同的反应条件分布，从而形成不同的气化结果。原则上来讲，反应条件和反应本身是通过传热、传质、传动相互影响的。任何化学反应能够进行的程度决定于平衡状态，这是热力学规律，但是化学反应动力学则决定了反应的快慢和产物的组成，因此通过对气化过程的热力学分析，能够知道气化反应的限度；要设计气化炉，还必须知道气化反应动力学信息，即焦的反应性。这里需要注意，焦以颗粒形式存在，因此焦与气化介质的反应必须考虑传质影响。本章的

后半部分在前半部分基础上，讨论了气化模型，包括热力学平衡模型、动力学模型、计算流体力学模型以及人工神经网络模型。作者表达了自己对气化模拟的观点，虽然模拟永远不可能代替好的实验数据，特别是气化过程这样的气固反应系统，但好的模拟能够起到如帮助找到已设计好气化炉的优化操作参数等方面的作用。本章最后给出了动力学模型在固定床气化、流化床气化以及气流床气化模拟方面的应用实例。

有了前面几章的基础，第 6 章讨论了生物质气化炉的设计方法并提供了一些解决设计问题的成功范例。一般来说，一个典型生物质气化工厂的设计包含了以下几个系统，即气化反应器、生物质预处理系统、进料系统、气体净化系统以及灰或固体残余物排出系统，本章集中讨论气化炉的设计。首先，气化炉的种类按照气固接触方式大体可分为 3 类：(1) 固定床或移动床；(2) 流化床；(3) 气流床。后续几节较为详细地介绍了这 3 大类气化炉的具体实现形式，如固定床或移动床中包含了上吸式、下吸式和错吸式气化炉形式；流化床中包含了鼓泡流化床和循环流化床形式，其中循环流化床又包含了输运床气化炉、双床气化系统以及化学链气化系统等；气流床包含了顶喷式、侧喷式等形式，在生物质的气流床气化中，特别介绍了科林 (Choren) 气化过程。接下来的一节简要介绍了另外一种超高温气化即等离子体气化方式。气化炉的设计包含过程设计和硬件设计两部分，过程设计首先需确定设计规格，然后进行物料和能量衡算，这里作者给出了计算方法和具体实例。接下来一节介绍了各种气化炉尺寸的确定方法。6.9 节专门详细介绍了气流床气化炉设计方法，包括炉体和周边辅助系统。6.10 节介绍了如何在系统层面对设计进行优化。6.11 节讨论了气化系统性能和操作方面的问题，包括气化炉的各种效率定义以及不同种类气化炉操作过程中需要注意的事项。总之，本章对气化系统设计的方方面面做了系统的描述，其内容无论对初学者、专业研究人员还是气化炉实际设计及操作人员都有极高的学习和参考价值，一定程度上可以当作气化的指导手册来用。

第 7 章介绍了气化领域相对较新的水热气化的研究进展。本章首先简述了水热气化的历史，最初是基于 20 世纪 70 年代中期的一个实验发现，即有机物质在亚临界水条件下可反应生成氢气、二氧化碳、焦油和焦，更重要的是，当将水提高到超临界状态时，焦油可以得到完全分解。生物质一般来说比其他燃料含水量要高很多，采用热方式气化以前，将水分蒸发脱除需要耗费很多能量，因此生物质的气化过程效率受水分含量的影响很大，以至于某些含水量太高的生物质用热气化转化根本不经济。由于水热气化本身就在水中进行，因此这种气化方式的效率基本不受原料含水量的影响，这是水热气化相比热气化最大的优势。接下来介绍了超临界水的概念和基本性质。基于超临界水的生物质能源转化主要有 3 条路线，即液化、气化成  $\text{CH}_4$  和气化成  $\text{H}_2$ ，本书主要讨论了后两条路线并介绍了

气化、水解、超临界氧化以及超临界水气化工厂的基本构成，随后介绍了影响超临界水气化的操作参数和条件，包括反应器温度、催化剂、停留时间、原料中固体浓度、加热速率、进料颗粒尺寸、压力以及反应器型式等。接下来介绍了生物质超临界水转化在实践中的应用，如能量转换、废弃物处置、化学品生产等。7.6 节介绍了反应动力学；7.7 节较为详细地讨论了超临界水反应器设计需要考虑的各个方面，包括反应温度确定、催化剂选择、反应器尺寸计算、热回收及热交换设计、碳燃烧系统设计、气-液分离系统设计、生物质进料系统设计等。接下来讨论了与超临界反应器设计相关的及关键的腐蚀问题，包括腐蚀机理和腐蚀防护。最后两节分别介绍了这类反应的能源效率和商业化所面临的挑战。

第 8 章讨论了生物质的预处理并提供了设计和选用预处理设备的依据。由于生物质具有纤维结构和非球形形状，其流动性极差，经常造成气化工厂进料困难。生物质预处理系统大体包含以下环节，即收集、存储和筛分、进料准备、运输和进料，本章对这些环节进行了较为详细的介绍，最后对各种反应器针对不同原料的进料器设计进行了相应讨论。

本书的前面章节都是在讨论如何将固体燃料转化为气体及其在能源生产中的应用，本书最后一章简要归纳了如何通过生物质气化方法生产某些重要的化学品和燃料。首先介绍了合成气概念和用途、合成气的生产、合成气的气化生产以及合成气的净化和调制。接下来介绍了生物油的概念、物理性质和用途。9.4 节介绍了合成气如何转化为各种化学品，包括甲醇合成、F-T 合成、氨合成以及甘油合成等。最后介绍了如何以生物质为原料生产交通燃料，包括生物化学法乙醇生产、合成汽油、合成柴油以及从非食物生物质原料生产交通燃料。

本书最后给出了 A、B、C 三个附录，其中附录 A 包含了生物质相关的一些定义；附录 B 罗列了一些物理常数；附录 C 包含了几组设计数据表。

本书是由国际循环流化床会议的创立者、加拿大 Dalhousie 大学的循环流化床实验室带头人 P. Basu 教授编著、学术出版社出版的系统介绍生物质气化和热解的最新专著，作者从清晰介绍生物质能源转化系统的基本原理开始，逐步进入到如何将这些原理应用到实际的设计当中，同时还介绍了技术发展的历史和最新前沿状况。本书可帮助能源化工领域的研究生、科研人员、工厂工程师及实际操作人员深入理解气化和热解的工作原理，同时为实际工艺过程的优化提供重要参考。

吴晋沪

中国科学院青岛生物能源与过程研究所



# 前 言

生物质气化和热解的历史基本与我们生存的自然环境一样古老。这两种过程在我们这个星球有植物存在的早期就开始起作用。森林大火的火焰跳动可以算是“灼烧（flaming）热解”的一个例子。沼泽地上的所谓“蓝色圣焰”（blue hallow）实际上是生物质分解形成甲烷气以及后续与空气接触而燃烧的例子。但是，人类学着开始利用这些过程则是很久以后的事。

首先，气化在工业和社会的大规模应用集中在以煤为燃料上，最初用作城市街道以及居民住房的照明。气化的应用虽然基本与燃烧技术的应用一样古老，但由于低价的石油和天然气的充足供应，它没有像燃烧一样随着工业化进程而兴起，只是在近年关于气化的兴趣才达到高潮，以下几个因素起了关键作用：

- 由于能源生产造成的温室气体减排需求
- 由于石油和天然气价格波动以及越来越不可靠的供应所形成的能源独立要求
- 可再生和局域可供能源的需求
- 石油和天然气价格不断上涨的推动

关于煤的气化已有几本优秀著作，但关于生物质气化和热解的著作还很有限。关于生物质气化和热解的专业文献已经有很多，最近出版的一些关于能源的书也包含了关于生物质气化内容的简单讨论，但全面介绍气化和热解的专门著作还很缺乏，特别是生物质方面。

很显然，无论是工程师、科学家，还是生物质气化工厂操作人员，都需要通过一个易于进入的渠道了解相关信息，关于气化技术主要方面的深入解析将帮助操作工理解气化工厂的工作原理；帮助设计工程师把握气化炉；帮助计划人员评估各种选择的好坏。本书的目的就是为了满足这些重要需求。作者试图在尽可能的情况下将可利用的研究结果打造成易于使用的设计方法，同时将一些新的先进过程如超临界水气化和生物质烘焙等带入读者的视野。

本书由 9 个章节和 3 个附录组成，其中包含了对设计气化炉及其组件很有用的大量图表。第 1 章介绍了气化的历史及最新进展，同时讨论了目前世界范围与气化相关的能源前景问题。第 2 章阐述了直接与生物质气化和热解相关的生物质性质。第 3 章讨论了热解基础，同时包含了烘焙的内容，另外还给读者介绍了热解反应器的设计和烘焙过程的单元组件。

第 4 章涉及生物质气化实践中非常重要的一个方面——焦油问题，提供了特定应用场合焦油在产品气中含量限度的信息，同时也讨论了降低产品气中焦油含

量的几种方法。第 5 章讨论了生物质气化的基础问题，阐述了气化过程及其涉及的重要化学反应，用以指导热解和气化。第 6 章讨论了气化炉的设计方法并提供了一些解决设计问题的成功范例。第 7 章介绍了水热气化新领域的进展，特别关注了生物质在超临界水中的气化，本章涵盖了这个相对较新领域的基础内容。

一个普遍存在但在气化工厂设计中常常被忽视的问题是生物质的预处理，第 8 章对这个问题进行了讨论并提供了设计和选用预处理设备的依据。化学品和合成燃料的重要性日益凸显，因此第 9 章简要归纳了如何通过生物质气化方法生产某些重要的化学品和燃料，对柴油和生物汽油的生产进行了简要介绍。附录 A 包含了生物质相关的一些定义；附录 B 罗列了一些物理常数；附录 C 包含了几组设计数据表。术语表列示了化工和气化工业中常用的名词。

### 致谢

作者在此非常感谢大量学生、同事以及研究人员，他们帮助作者对本书进行了大量修改和完善工作并允许作者在本书中采用他们已发表的材料。D. Groulux 博士、I. Ugursal 博士、N. Mahinpey 博士、N. Bakshi 博士、A. Dutta 博士、A. M. Leon 博士和 P. Kaushal 博士阅读了本书部分章节并提出了极有价值的建议。很多学生为本书的出版付出了辛勤的劳动，特别是 M. Greencorn、S. Rao、V. Mettanant、B. Acharya、A. Dhungana 和 A. Basu。作者希望本书的出版至少能对一些学生和（或）专业工作者有所裨益，使我们周围的世界变得更绿色一些，更宜居一些。

最后，如果没有我的夫人——Rama Basu 的一贯支持和鼓励，本书不可能完成，在此衷心感谢！

(吴晋沪 译)

## 作者简介

Prabir Basu 博士是一个活跃的气化炉研究者和设计者，特别在生物质流化床气化方面。其近期研究兴趣包括一些前沿领域，如超临界水气化以及生物质混烧应用研究。他是每三年一度召开的卓有声望的循环流化床国际会议的创立者，也是 Greenfield Research Incorporated，一家建在加拿大的以流化床锅炉和气化炉为专业的私属研究开发公司的创建者。

Basu 教授在能源转化和环境方面已经工作了 30 余年。在加入 Dalhousie 大学（前身为 Nova Scotia 技术大学）工程系之前，他同时在一个政府的研究实验室和私营的锅炉制造公司工作。

Basu 博士在把研究成果应用到工业实践方面的热情已为世人所熟知，正如他正在致力于将先进知识推广到全世界一样。他在能源和环境新出现的领域发表 200 多篇论文和出版 6 部专著，其中部分已经译成中文或韩文。他曾在世界各地的大学和企业讲授短期课程和发表演讲。目前，他领导着位于加拿大 Dalhousie 大学的循环流化床实验室。

（吴晋沪 译）

The art of gasification and pyrolysis of biomass is as old as our natural habitat. Both processes have been at work since the early days of vegetation on this planet. Flame leaping from forest fires is an example of “flaming pyrolysis.” Blue hallow in a swamp is an example of methane gas formation through decomposition of biomass and its subsequent combustion in contact with air. Human beings, however, learned to harness these processes much later.

First, large-scale application of gasification for industry and society concentrated on coal as the fuel. It was primarily for lighting of city streets and affluent people’s houses. Use of gasification, though nearly as ancient as combustion technologies, did not rise with industrialization the same as combustion because of the abundant supply and low prices of oil and natural gas. Only in the recent past has there been an upsurge in interest in gasification, fueled by several factors:

- Interest in the reduction in greenhouse gas emissions as a result of energy production
- Push for independence from the less reliable supply and fluctuating prices of oil and gas
- Interest in renewable and locally available energy sources
- Rise in the price of oil and natural gas

Several excellent books on coal gasification are available, but a limited few are available about biomass gasification and pyrolysis. A large body of peer-reviewed literature on biomass gasification and pyrolysis is available; some recent books on energy also include brief discussions on biomass gasification. However, there is a dearth of comprehensive publications specifically on gasification and pyrolysis; this is especially true for biomass.

Engineers, scientists, and operating personnel of biomass gasification plants clearly need such information from a single easy-to-access source. Better comprehension of the main aspects of gasification technology could help an operator understand the workings of the gasification plant, a design engineer to size the gasifier, and a planner to evaluate different options. The present book was written to fill this important need. It attempts to mold available research results in an easy-to-use design methodology whenever possible. Additionally, it brings into focus new advanced processes such as supercritical water gasification and torrefaction of biomass.

This book is comprised of nine chapters and three appendices, which include several tables that could be useful for the design of biomass gasifiers and their

components. Chapter 1 introduces readers to the art of gasification and its present state of art. It also discusses the relevance of gasification to the current energy scenario around the world. Chapter 2 presents the properties of biomass with specific relevance to gasification and pyrolysis of biomass. The basics of pyrolysis are discussed in Chapter 3, which also covers torrefaction. In addition, it introduces readers to the design of a pyrolyzer and elements of the torrefaction process.

Chapter 4 deals with an important practical aspect of biomass gasification—the tar issue. This chapter provides information on the limits of tar content in product gas for specific applications. It also discusses several means of reduction in tar in the product gas. Chapter 5 concerns the basics of the gasification of biomass. It explains the gasification process and important chemical reactions that guide pyrolysis and gasification. Chapter 6 discusses design methodologies for gasifiers and presents some worked-out examples on design problems. Chapter 7 introduces the new field of hydrothermal gasification, with specific reference to gasification of biomass in supercritical water. It covers the basics of this relatively new field.

One of the common, but often neglected, problems in the design of a gasification plant is the handling of biomass. Chapter 8 discusses issues related to this and provides guidelines for the design and selection of handling equipment. The production of chemicals and synthetic fuels is gaining importance, so Chapter 9 provides a brief outline of how some important chemicals and fuels are produced from biomass through gasification. Production of diesel and biogasoline is also discussed briefly here. Appendix A contains definitions of biomass and Appendix B lists physical constants. Appendix C includes several tables containing design data. The Glossary presents definitions of some terms used commonly in the chemical and gasification industries.

## ACKNOWLEDGMENTS

The author is greatly indebted to a large number students, professional colleagues, and institutions who helped revise numerous drafts of this book and provided permission for the use of published materials. Drs. D. Groulux, I. Ugursal, N. Mahinpey, N. Bakshi, A. Dutta, A. M. Leon, and P. Kaushal read parts of the manuscript and provided valuable suggestions. Many students worked tirelessly to support the work on this book. Special efforts were made by M. Greencorn, S. Rao, V. Mettanant, B. Acharya, A. Dhungana, and A. Basu. My hope is that is that what is here will benefit at least some students and/or practicing professionals in making the world around us a little greener and more habitable.

Finally, this book would not have materialized without the constant encouragement of my wife, Rama Basu.



Dr. Prabir Basu is an active researcher and designer of gasifiers with a specific interest in fluidized-bed gasification of biomass. His current research interests include frontier areas, such as supercritical gasification, as well as applied research dealing with biomass co-firing. He is the founder of the prestigious triennial International Conference series on Circulating Fluidized Beds, and founder of Greenfield Research Incorporated, a private research and development company based in Canada that specializes in fluidized-bed boilers and gasification.

Professor Basu has been working in the field of energy conversion and the environment for more than 30 years. Prior to joining the engineering faculty at Dalhousie University (formerly known as the Technical University of Nova Scotia), he worked with both a government research laboratory and a private boiler manufacturing company.

Dr. Basu's passion for the transformation of research results into industrial practice is well known, as is his ongoing commitment to spreading advanced knowledge around the world. He has authored more than 200 research papers and six monographs in emerging areas of energy and environment, some of which have been translated into Chinese and Korean. He teaches short courses and seminars in industries and at universities across the globe. Presently, he leads the Circulating Fluidized-Bed Research Laboratory at Dalhousie University in Canada.

# 目 录

前言 .....	vii
作者简介 .....	ix
第 1 章 简介 .....	1
第 2 章 生物质特性 .....	27
第 3 章 热解和烘焙 .....	65
第 4 章 焦油的产生和分解 .....	97
第 5 章 气化理论和气化炉模型 .....	117
第 6 章 生物质气化炉的设计 .....	167
第 7 章 生物质的水热气化 .....	229
第 8 章 生物质预处理 .....	269
第 9 章 以生物质为原料生产合成燃料和化学品 .....	301
附录 A 生物质的定义 .....	325
附录 B 物理常数 .....	327
附录 C 相关设计参数表 .....	329
术语表 .....	337
参考文献 .....	339
索引 .....	353

(吴晋沪 译)

---

## Contents

	Preface	vii
	About the Author	ix
<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>Chapter 2</b>	<b>Biomass Characteristics</b>	<b>27</b>
<b>Chapter 3</b>	<b>Pyrolysis and Torrefaction</b>	<b>65</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>Tar Production and Destruction</b>	<b>97</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>Gasification Theory and Modeling of Gasifiers</b>	<b>117</b>
<b>Chapter 6</b>	<b>Design of Biomass Gasifiers</b>	<b>167</b>
<b>Chapter 7</b>	<b>Hydrothermal Gasification of Biomass</b>	<b>229</b>
<b>Chapter 8</b>	<b>Biomass Handling</b>	<b>269</b>
<b>Chapter 9</b>	<b>Production of Synthetic Fuels and Chemicals from Biomass</b>	<b>301</b>
<b>Appendix A</b>	<b>Definition of Biomass</b>	<b>325</b>
<b>Appendix B</b>	<b>Physical Constants</b>	<b>327</b>
<b>Appendix C</b>	<b>Selected Design Data Tables</b>	<b>329</b>
<b>Glossary</b>		<b>337</b>
	References	339
	Index	353



# Introduction

Gasification is a chemical process that converts carbonaceous materials like biomass into useful convenient gaseous fuels or chemical feedstock. Pyrolysis, partial oxidation, and hydrogenation are related processes. Combustion also converts carbonaceous materials into product gases, but there are some important differences. For example, combustion product gas does not have useful heating value, but product gas from gasification does. Gasification packs energy into chemical bonds while combustion releases it. Gasification takes place in reducing (oxygen-deficient) environments requiring heat; combustion takes place in an oxidizing environment giving off heat.

The purpose of gasification or pyrolysis is not just energy conversion; production of chemical feedstock is also an important application. In fact, the first application of pyrolysis of wood into charcoal around 4000 B.C.E. was not for heating but for iron ore reduction. In modern days, gasification is not restricted to solid hydrocarbons. Its feedstock includes liquid or even gases to produce more useful fuels. Partial oxidation of methane gas is widely used in production of synthetic gas, or *syngas*, which is a mixture of  $H_2$  and  $CO$ .

Pyrolysis (see Chapter 3), the pioneer in the production of charcoal and the first transportable clean liquid fuel *kerosene*, produces liquid fuels from biomass. In recent times, gasification of heavy oil residues into syngas has gained popularity for the production of lighter hydrocarbons. Many large gasification plants are now dedicated to production of chemical feedstock from coal or other hydrocarbons. Hydrogenation, or hydrogasification, which involves adding hydrogen to carbon to produce fuel with a higher hydrogen-to-carbon (H/C) ratio, is also gaining popularity. Supercritical gasification (see Chapter 7), a new option for gasification of very wet biomass, is drawing growing interest.

This chapter introduces the subject of biomass gasification with a short description of its historical developments, its motivation, and its products. It also gives a brief introduction to the chemical reactions that are involved in gasification.