



Catalysis for Renewables
From Feedstock to Energy Production

可再生资源催化技术 ——从资源到能源生产

[意] 加百勒·森迪 (Gabriele Centi)

主编

[荷] 拉特格 A.范·桑滕 (Rutger A. van Santen)

黄和 余定华 等译



化学工业出版社



Catalysis renewables
From Feedstock to Energy Production

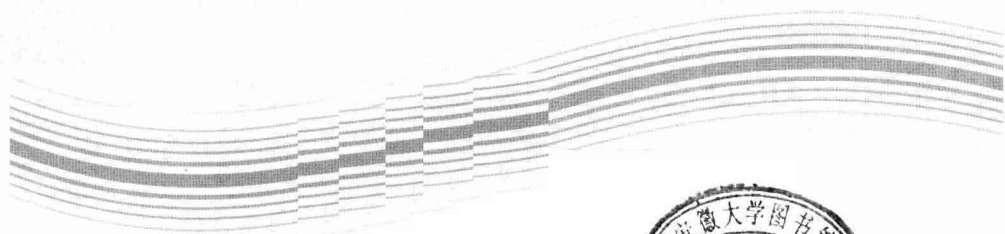
可再生资源催化技术 ——从资源到能源生产

[意] 加百勒·森迪 (Gabriele Centi)

主编

[荷] 拉特格 A.范·桑滕 (Rutger A.van Santen)

黄和 余定华 等译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分为 17 章, 内容主要包括木质纤维素转化、可再生资源转化为生物产品的工艺选择、生物基油脂化学品的工业开发和应用、基于可再生资源的精细化学品、生物质热化学转化为燃料的催化选择、生物乙醇、甘油转化制交通燃料、甘油的催化转化、脂肪酸的选择性环氧化催化工艺、可再生氢能、CO₂ 捕集以及光催化制氢等。

本书可以作为高等学校生物工程、化学工程、精细化工、能源化工、产品工程等专业的研究生教学用书, 也可供相关领域管理人员、技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生资源催化技术——从资源到能源生产/[意]森迪(Centi, G.), [荷]桑滕(Santen, R. A.) 主编; 黄和, 余定华等译. —北京: 化学工业出版社, 2011. 9
书名原文: Catalysis for Renewables From Feedstock to Energy Production
ISBN 978-7-122-11873-8

I. 可… II. ①森…②桑…③黄…④余… III. 再生资源: 能源-转化-微生物催化作用-研究 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 142738 号

Catalysis for Renewables; From Feedstock to Energy Production, 1st edition/by Gabriele Centi and Rutger A. Van Santen
ISBN 978-3-527-31788-2

Copyright©2007 by Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. kGAA. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. kGAA

本书中文简体字版由 Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. kGAA 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2010-4576

责任编辑: 成荣霞
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 22 1/4 字数 420 千字 2012 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

译者前言

进入 21 世纪，现代社会的发展面临着资源短缺、能源危机和环境恶化等严重问题。化石资源的显著特点是不可再生性，并且储量有限，化石资源短缺已经成为全球经济发展的瓶颈因素之一；煤、石油、天然气等化石资源的过度消耗已经导致了能源供应短缺和价格上涨，阻碍了现代经济的发展；化石能源制品的消耗，带来了严重的环境污染和温室效应，因此而给全球造成的经济损失高达每年 600 亿美元。

严重的资源、能源与环境危机引起全球关注，各国提出了相应的发展战略。美国总统布什在 2006 年 1 月 31 日发表的政府国情咨文中提到：美国必须像戒毒一样戒掉“油瘾”，依靠科学技术的发展，在 2025 年之前减少由中东进口原油量的 75%，并有效地减少环境污染，建立一种不依赖于原油的新的经济发展模式。瑞典——欧盟重要的石油消费国更是提出了要在精神上和技术上做好充分的准备，在 2020 年之前建立一个“无油的国家”。人类社会进入了“后化石经济时代”，改变目前依赖于化石的高消耗、高污染的经济发展模式，寻求化石资源的替代，建立低消耗、高附加值的可持续的循环经济发展模式，已经成为全球社会经济可持续发展的重大战略方向。

在太阳能的驱动下，生物提供了地球生态中最大量的可再生资源——生物质，使得地球成为一个循环的可持续发展的生态系统。全球每年光合作用产生的生物质可达 960 亿吨有机碳，远远高于全世界目前化石资源的年消耗量（每年消耗 65 亿吨有机碳），同时还清除了 CO_2 ，放出大量 O_2 。利用生物技术，利用地球生态中的可再生资源——生物质，以其作为自身的物质基础，将可持续发展的工业融入地球大体系的物质循环之中，融入到扩大农业生产的生物量之中，实现在太阳能驱动下的工业与农业联盟，构筑人类文明的新形式——生物经济，这是新文明的基础，而催化技术则是实现可再生生物质资源有效利用的核心技术。

在开展生物质催化转化研究过程中，我们注意到在 2007 年德国 Wiley 出版集团公司出版的这本“Catalysis for Renewables: From Feedstock to Energy Production”。近年来，生物质催化转化的研究工作在不同方面取得了大量的研究成果，此书则是论述在催化研讨会的基础上，利用可再生资源生产能源、燃料、材料和化学品过程中的催化技术，对催化剂、催化工艺以及设备等给予了全面的介绍，并且对可再生能源的市场以及技术经济性进行了评价，为未来生物质资源开发利用过程指明了重点研究方向。我们认为，这本书将为我国生物质资源

高效利用的研究者提供非常宝贵的参考素材，推动我国生物基能源、生物基材料以及生物基化学品的产业化进程。因此，于 2009 年在化学工业出版社编辑的建议和支持下着手翻译这本专著。

南京大学的丁维平教授、薛念华博士，东南大学的肖睿教授，南京工业大学的胡焱副教授、张红漫副教授、韩毓旺副教授、纪晓俊博士也参加了本书的文字翻译和大量图表的绘制工作。

在本书翻译过程中，虽然几经讨论，数易其稿，但疏漏或错谬仍在所难免，敬请读者批评指正。

本书的翻译出版得到国家重点基础研究发展计划（“973”计划）项目的资助（项目编号：2011CB710800），特此表示感谢！

最后，谨向在本书翻译过程中给予我们关心和帮助的领导和同行表示衷心感谢！

黄 和
余定华

2012 年 2 月

原版序

化石燃料持续增长的价格、化石燃料的环境影响、对温室效应的考虑以及能源供应安全的需要等正在加速生物经济的转变。这种转变需要各种 R&D 工具来实现。近年来全世界范围内已经实现用生物质替代化石燃料，例如，欧盟已经确定可再生能源所占份额从 1997 年的 6% 增长到 2010 年的 12% COM 1997 599。

利用可再生资源生产化学品和其他产品，例如由油料作物生产油脂、由谷物和马铃薯生产淀粉、由稻草和树木生产纤维素，也正受到政策制定部门越来越多的关注。这些产品进一步转变可以生产传统由化石资源生产的聚合物、润滑油、溶剂、表面活性剂和专用化学品。然而，必须扩展使用生物质生产化学品，将其集成到能源领域以实现可持续发展。起初在食品和造纸工业形成的生物炼制的概念，现在正逐渐应用于能源、材料和化学品生产集成生产领域。生物炼制通过生产多种产品实现复杂生物质资源价值最大化。生物产品的集成生产，特别是大宗化学品、生物燃料、生物润滑油和聚合物，能提高生物产品的竞争力和经济效益。在这种情况下，为了应对石油基能源、材料和化学品经济发生的这种变化，必须发展新的 R&D 工具。

欧盟工业、消费者以及环境都能通过使用可再生材料获得许多利益：(a) 增加具有定制功能的产品与传统材料相比较或相结合的竞争力；(b) 较为稳定或安全的供应来源；(c) 减少对环境的影响；(d) 新的快速增长的市场，也为工业提供经济利益；(e) 在过程工业和农业领域提供就业机会。

在生物炼制过程中要真正有效利用可再生材料还需要许多方面的提高。需要用植物的全利用替代目前的使用率，需要开发新工艺提高植物各部分的附加值以及稳定其他工业系统副产品的价格（例如，在木质/造纸工业的黑液，生物柴油过程的甘油，奶酪生产中的乳浆等），需要开发下游处理工艺（低成本回收和精制工艺），开发闭路循环可持续系统等。

催化技术是目前化石经济的核心技术。超过 90% 的工业化学过程涉及催化步骤，而且目前炼油过程中几个工艺都是催化过程。假如没有催化技术的持续进步和创新，就不可能有目前普遍存在的石油经济。同样，催化技术也将在生物经济转变过程中处于核心地位。实现这种转变和开发高效生物炼制的可能性，将依赖于催化新工艺和新概念开发过程所取得的进展。

因此，催化可以被认为是促进这种转变的技术，也是由于这个原因，我们必须很好地理解在实施催化的局限性和可能性。我们需要明确未来必需的 R&D 方向和所需要的基础和应用知识。换句话说，需要开发基于可再生资源的催化过程

路线图。本书旨在提供与这样的研究议程相关的研究现状的纵观。

本书源自于 2006 年 5 月 16~18 日在荷兰科尔克拉德举办的“可再生资源催化”研讨会。这次研讨会的目标是为可再生资源转换为能源和化学品的催化过程选择提供战略性投入。这是一次集思广益的会议，旨在通过将企业、政府和学术界观点结合以明确本领域催化研究的新方向和机遇。本书的不同章节涉及本次研讨会讨论的不同方面，而最后一章对本次研讨会所进行的积极讨论进行了一个非常关键的组合，目标在于明确生物质催化转化的研究战略议程。

本次研讨会是由荷兰的 NRSC-催化（国家研究院组合催化）协会在欧盟卓越 IDECAT（可持续生产中催化材料的集成设计）网络活动框架下举办的。

本卓越网络的目标是加强催化研究，通过创造不同催化学科团体（均相催化、多相催化和生物催化）之间科研、技术诀窍和培训的一致研究框架，使欧洲主要机构之间获得持续的结合。IDECAT 将创造虚拟的“欧洲催化研究机构”（ERIC），作为欧洲催化研究的主要参考点。

IDECAT 的研究集中于：（a）纳米对象的合成与控制，未来的催化材料，也将通常的概念集成到其他的纳米技术中；（b）搭建理论和模型、表面科学以及动力学/应用催化之间的桥梁，以及缩小在多相催化、均相催化和生物催化方法之间的差别；（c）开发催化纳米材料的集成设计方法。

IDECAT 的目标是：

- ① 创造高于合作的大量的经验。
- ② 创造以纳米技术为基础的催化剂的文化主题特性。
- ③ 提高欧洲研究的成本效率。
- ④ 建立前沿研究团体，能够促进催化技术使用方面的创新，特别是在 SMEs 水平上。
- ⑤ 增加应用于纳米催化的多学科方法的培训和教育。
- ⑥ 将超出卓越网络的优异之处扩展到科学团体和普通市民。

下一代催化剂在化学反应中应该做到零排放以及选择性使用能量。他们也将能够开发新型生物模拟催化转化，新型清洁能源和化学存储方法，新型/可再生原材料的利用和废物再利用，解决全球问题（温室气体排放、水和大气质量）以及实现智能设备。这些富有挑战的目标只能通过最好的催化研究中心和公司公共机构之间长期的紧密合作才能实现，这也是 IDECAT 的目标。

总的来说，本书是 IDECAT 开发一致的活动框架，通过催化创造生物基和可持续社会迈出的第一步，同时，本书也是对研究现状进行的实时评述，明确了 R&D 的新方向、新机会和新需要。最后，我们感谢荷兰 NRSC-Catalysis 的 Ad Kolen 博士对这次研讨会和本书提供了无限的支持和帮助。

Gabriele Centi
Rutger A. van Santen

编写人员名单

Simone Albertazzi

University of Bologna
Department of Chimica
Industriale e dei Materiali
Alma Mater Studiorum
Viale Risorgimento 4
40136 Bologna
Italy

Bogdan A. Albrecht

Eindhoven University of
Technology
Department of Mechanical
Engineering
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands
Present address:
DAF Trucks N.V.
Advanced Engineering Engines
Hugo van der Goeslaan 1
P.O. Box 90065
5600 PT Eindhoven
The Netherlands

Dave M. Austgen

Shell Hydrogen LLC
700 Milam Street
Houston, TX 77002
USA

Francesco Basile

University of Bologna
Department of Chimica Industriale e
dei Materiali
Alma Mater Studiorum
Viale Risorgimento 4
40136 Bologna
Italy

Rob J.M. Bastiaans

Eindhoven University of Technology
Department of Mechanical Engineering
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Herman van Bekkum

Delft University of Technology
DelftChem Tech
Self Assembling Systems
Julianalaan 136
2628 BL Delft
The Netherlands

Ruud W. van den Brink

Energy Research Centre
of the Netherlands (ECN)
Programme Unit Hydrogen
and Clean Fossil Fuels
Westerduinweg 3
1755 LE Petten
The Netherlands

Frank A. de Bruijn

Energy Research Centre
of the Netherlands (ECN)
Programme Unit Hydrogen
and Clean Fossil Fuels
Westerduinweg 3
1755 LE Petten
The Netherlands

Gabriele Centi

University of Messina
Department of Industrial
Chemistry and Engineering
of Materials
Salita Sperone 31

98166 Messina
Italy

Els D'Hondt

Katholieke Universiteit Leuven
Centrum voor Oppervlaktechemie
en Katalyse
Kasteelpark Arenberg 23
3001 Leuven (Heverlee)
Belgium

François Fajula

Institut Charles Gerhardt
UMR 5253 CNRS-ENSCM-
UM2-UM1
Equipe "Matériaux Avancés pour
la Catalyse et la Santé" (MACS)
Ecole Nationale Supérieure de
Chimie de Montpellier
8, rue de l'Ecole Normale
34296 Montpellier Cedex 5
France

Giuseppe Fornasari

University of Bologna
Department of Chimica
Industriale e dei Materiali
Alma Mater Studiorum
Viale Risorgimento 4
40136 Bologna
Italy

Pierre Gallezot

Université de Lyon
Institut de Recherche sur la Catalyse et
l'Environnement de Lyon
2, avenue Albert Einstein
69626 Villeurbanne Cedex
France

L. Philip H. de Goey

Eindhoven University of Technology
Department of Mechanical Engineering
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Matteo Guidotti

CNR
Institute of Molecular Sciences and
Technologies (ISTM)
Dipartimento Chimica Inorganica,
Metallorganica e Analitica
via Venezian, 21
20133 Milano
Italy

Karlheinz Hill

Cognis GmbH
Care Chemicals Technology
Rheinpromenade 1
40789 Monheim
Germany

Joep P.P. Huijsmans

Shell Hydrogen BV
P.O. Box 162
2501 AN The Hague
The Netherlands

Pierre Jacobs

Katholieke Universiteit Leuven
Centrum voor Oppervlaktechemie
en Katalyse
Kasteelpark Arenberg 23
3001 Leuven (Heverlee)
Belgium

Reetta K. Karinen

Helsinki University of Technology
Department of Chemical
Technology
P.O. Box 6100
02150 Hut
Finland

Sascha R. A. Kersten

University of Twente
Thermal-Chemical Conversion
of Biomass (TCCB)
Faculty of Science and Technology,
JMPACT
P.O. Box 217
7500 AE Enschede

The Netherlands

Tom Kieboom

Leiden University
Institute of Chemistry
p/a Stationsweg 56
2991 CM Barendrecht
The Netherlands

Gert Jan Kramer

Eindhoven University of
Technology
Faculteit Scheikundige
Technologie
SKA; STW 3.42
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

A. Outi I. Krause

Helsinki University of Technology
Department of Chemical
Technology
P.O. Box 6100
02150 Hut
Finland

Hans A.J.A. van Kuijk

Eindhoven University of Technology
Department of Mechanical Engineering
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Jean-Paul Lange

Shell Global Solutions International
B.V.
P.O. Box 38000
1030 BN Amsterdam
The Netherlands

Leon Lefferts

University of Twente
Catalytic Processes and Materials
(CPM)
Faculty of Science and Technology,

JMPACT

P.O. Box 217
7500 AE Enschede
The Netherlands

Leendert Maat

Delft University of Technology
Biocatalysis and Organic Chemistry
Julianalaan 136
2628 BL Delft
The Netherlands

Valter Maurino

Università di Torino
Dipartimento di Chimica Analitica
Via P. Giuria 5
10125 Torino
Italy

Claudio Minero

Università di Torino
Dipartimento di Chimica Analitica
Via P. Giuria 5
10125 Torino
Italy

Jeroen A. van Oijen

Eindhoven University of
Technology
Department of Mechanical
Engineering
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Stephane Pariente

Institut Charles Gerhardt
UMR 5253 CNRS-ENSCM-UM2-
UM1
Equipe "Matériaux Avancés pour
la Catalyse et la Santé" (MACS)
Ecole Nationale Supérieure de
Chimie de Montpellier
8, rue de l'École Normale
34296 Montpellier Cedex 5
France

Siglinda Perathoner
University of Messina
Department of Industrial
Chemistry and Engineering of
Materials
Salita Sperone 31
98166 Messina
Italy

Rinaldo Psaro
CNR
Institute of Molecular Sciences
and Technologies (ISTM)
Dipartimento Chimica Inorganica,
Metallorganica e Analitica
Via Venezian 21
20133 Milano
Italy

Nicoletta Ravasio
CNR
Institute of Molecular Sciences and
Technologies (ISTM)
Dipartimento Chimica Inorganica,
Metallorganica e Analitica
Via Venezian 21
20133 Milano
Italy

Bert Rietveld
ECN (Energy Research Centre
of the Netherlands)
P.O. Box 1
1755 LE Petten
The Netherlands

Rutger A. van Santen
Eindhoven University of Technology
Schuit Institute of Catalysis
Laboratory of Inorganic Chemistry
and Catalysis
P.O. Box 513
5600 MB Eindhoven
The Netherlands

Bert Sels
Katholieke Universiteit Leuven

Centrum voor Oppervlaktechnie
en Katalyse
Kasteelpark Arenberg 23
3001 Leuven (Heverlee)
Belgium

Kulathuier Seshan
University of Twente
Catalytic Processes and Materials
(CPM)
Faculty of Science and Technology,
JMPACT
P.O. Box 217
7500 AE Enschede
The Netherlands

Maïla Sgobba
University of Milan
Dipartimento Chimica
Inorganica, Metallorganica e
Analitica
Via Venezian 21
20133 Milano
Italy

Wim P. M. van Swaaij
University of Twente
Thermal-Chemical Conversion
of Biomass (TCCB)
Faculty of Science and Technology,
JMPACT
P.O. Box 217
7500 AE Enschede
The Netherlands

Nathalie Tanchoux
Institut Charles Gerhardt
UMR 5253 CNRS-ENSCM-
UM2-UM1
Equipe "Matériaux Avancés pour
la Catalyse et la Santé" (MACS)
Ecole Nationale Supérieure de
Chimie de Montpellier
8, rue de l'Ecole Normale
34296 Montpellier Cedex 5
France

Ferruccio Trifirò

University of Bologna
Dipartimento di Chimica
Industriale e dei Materiali
Alma Mater Studiorum
Viale Risorgimento 4
40136 Bologna
Italy

Angelo Vaccari

University of Bologna
Department of Chimica

Industriale e dei Materiali
Alma Mater Studiorum
Viale Risorgimento 4
40136 Bologna
Italy

Tiia S. Viinikainen

Helsinki University of Technology
Department of Chemical Technology
P.O. Box 6100
02150 Hut
Finland

目 录

1 可再生资源催化技术——远景	1
1.1 引言	1
1.2 经济和社会背景	1
1.3 技术选择	4
1.4 生物质转化的工艺选择	11
1.5 小结	16
参考文献	16
2 木质纤维素转化：化学、工艺及经济性	17
2.1 概述	17
2.2 引言	17
2.2.1 可再生能源的需求	17
2.2.2 生物质转化的必要性	18
2.2.3 生物质组成	19
2.2.4 燃料和化学品成分	20
2.2.5 生物质脱氧	21
2.3 化学工艺	21
2.3.1 碳水化合物化合物的关键反应	22
2.3.2 热裂解	23
2.3.2.1 化学原理	23
2.3.2.2 产品应用	24
2.3.2.3 生产工艺	25
2.3.2.4 其他工艺研究进展	25
2.3.3 气化	26
2.3.3.1 化学原理	26
2.3.3.2 生产工艺	27
2.3.3.3 替代发展：制氢	28
2.3.4 水解	28
2.3.4.1 化学原理	28

2.3.4.2	糖衍生物	29
2.3.4.3	工艺	30
2.3.4.4	研究进展	30
2.3.5	发酵	31
2.3.5.1	化学原理	31
2.3.5.2	工艺过程	32
2.3.5.3	最新进展	33
2.4	经济性	33
2.4.1	方法学	34
2.4.2	燃料的生产	34
2.4.2.1	工厂成本	34
2.4.2.2	原料成本	35
2.4.2.3	生产成本	35
2.4.3	生产规模	37
2.4.4	化学品生产	38
2.5	总结和讨论	39
	参考文献	40

3 可再生能源催化转化为生物制品的工艺选择 43

3.1	概述	43
3.2	引言	43
3.3	生物炼制的概念	45
3.4	生物质转化成生物制品的策略	45
3.4.1	通过降解化合物实现生物质转化	45
3.4.2	通过平台化合物实现生物质转化	46
3.4.2.1	主要平台化合物的确认	46
3.4.2.2	平台化合物转化为生物产品的实例	47
3.4.3	通过新合成路线实现生物质转化	52
3.4.3.1	一锅反应的级联催化	53
3.4.3.2	一锅反应生成混合产物	53
3.5	小结	56
	参考文献	58

4 生物基油脂化学品的工业开发和应用 61

4.1	概述	61
-----	----	----

4.2	原材料现状	61
4.3	生态兼容性	62
4.4	产品举例	63
4.4.1	油脂化合物的聚合物应用	64
4.4.1.1	基于二聚酸的二聚二醇	65
4.4.1.2	基于环氧化物的多元醇	67
4.4.2	用作润滑剂可生物降解的脂肪酸酯	68
4.4.3	基于脂肪醇和脂肪酸的植物油衍生的表面活性剂及乳化剂	69
4.4.3.1	脂肪醇硫酸盐 (FAS)	71
4.4.3.2	酰基蛋白及氨基酸 (蛋白-脂肪酸缩合物)	72
4.4.3.3	基于碳水化合物的表面活性剂——烷基多糖苷	73
4.4.3.4	烷基多糖苷羧酸	74
4.4.3.5	多元醇酯	75
4.4.3.6	用于皮肤和毛发的多功能护理添加剂	76
4.4.4	润肤剂	77
4.4.4.1	二烷基碳酸盐	77
4.4.4.2	Guerbet 醇	78
4.5	展望	78
	致谢	79
	参考文献	79

5 源于可再生资源的精细化学品 81

5.1	引言	81
5.2	香草醛	83
5.3	单萜	84
5.4	生物碱类	87
5.5	类固醇	90
5.6	对映立体选择性的催化作用	91
5.7	青蒿素	92
5.8	达菲	93
5.9	小结	93
	致谢	94
	参考文献	94

6 生物质热化学转化为燃料的催化选择 96

6.1	引言	96
-----	----	----

6.2	生物质作为原料制备能源	97
6.3	生物质的组成	98
6.4	生物炼制	101
6.5	生物质预处理	102
6.6	木质纤维素的热化学转化	102
6.7	生物质气化	104
6.7.1	干生物质的气化	104
6.7.2	裂解油的催化气化	105
6.7.3	气化过程化学和催化	105
6.7.4	热压缩水中的气化	106
6.8	生物质液化	107
6.8.1	非催化高温裂解	107
6.8.2	催化高温裂解	109
6.8.3	水热液化	110
6.9	裂解油浓缩形成燃料	110
6.9.1	脱羧 (DCO)	110
6.9.2	水合脱氢 (HDO)	111
6.9.3	沸石上的裂解 (FCC)	111
6.10	水解	112
6.11	催化剂设计的基本方法	113
6.12	小结	114
	参考文献	114

7 生物质热转化技术 119

7.1	引言	119
7.2	生物质资源及生物质预处理	120
7.3	生物质燃烧	120
7.4	生物质气化	121
7.5	生物质热解	125
7.6	通过生物质热转化生成燃料	128
7.7	小结	131
	参考文献	131

8 生物质热转化及其在炉排炉中 NO_x 的排放 133

8.1	引言	133
-----	----	-----

8.2	可调二极管激光测量生物质转化动力学	134
8.2.1	引言	134
8.2.2	可调二极管激光器的栅格型反应器的实验	134
8.2.3	实验装置	135
8.2.4	结果	136
8.3	热转化层传播机理	138
8.3.1	引言	138
8.3.2	模型建立	139
8.3.3	试验	141
8.4	炉排炉的气相计算流体力学 (CFD) 模型	143
8.4.1	引言	143
8.4.2	模型描述	143
8.4.3	数值模拟与验证中查表法的结构	144
8.4.4	燃烧模型在二维炉排炉中的应用	145
8.5	小结	145
	致谢	146
	参考文献	146

9 生物乙醇：生产工艺及产品的升级与资源化利用 **148**

9.1	引言	148
9.2	生产工艺概述	152
9.3	用作生物燃料	157
9.3.1	生物乙醇作为燃料添加剂	157
9.3.1.1	汽油/生物乙醇混合燃料	157
9.3.1.2	柴油/生物乙醇混合燃料	158
9.3.2	生物乙醇和氢	159
9.3.3	生物乙醇用于燃料电池	161
9.4	生物乙醇改进及资源化利用	162
9.4.1	转化成燃料组分	162
9.4.2	转化成化学品	165
9.5	小结	166
	参考文献	166

10 甘油转化制交通燃料 **169**

10.1	引言	169
------	----------	-----