

清华大学能源动力系列教材

燃烧学导论：概念与应用 (第3版)

An Introduction to Combustion Concepts and Applications (Third Edition)

[美] Stephen R. Turns 著
姚强 李水清 王宇 译
Yao Qiang Li Shuiqing Wang Yu

清华大学出版社

Mc
Graw
Hill
Education

清华大学能源动力系列教材

燃烧学导论：概念与应用 (第3版)

An Introduction to Combustion Concepts and Applications (Third Edition)

[美] Stephen R. Turns 著

姚强 李水清 王宇 译

Yao Qiang Li Shuiqing Wang Yu

清华大学出版社

北京

Stephen R. Turns

An introduction to Combustion: Concepts and Applications, 3e

ISBN: 0-07-338019-9

Copyright © 2012 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权© 2015 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学导论:概念与应用:第3版/(美)特纳斯(Turns, S. R.)著;姚强,李水清,王宇译.--北京:清华大学出版社,2015

书名原文:An introduction to combustion: concepts and applications 3rd edition

清华大学能源动力系列教材

ISBN 978-7-302-37190-8

I. ①燃… II. ①特… ②姚… ③李… ④王… III. ①燃烧学—高等学校—教材 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 266554 号

责任编辑:杨倩 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:41.5

字 数:904 千字

版 次:2015 年 5 月第 1 版

印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:79.00 元

关于作者

Stephen R. Turns 于 1970 年, 1974 年和 1979 年分别在宾夕法尼亚州立大学、韦恩州立大学和威斯康星大学麦迪逊分校获得机械工程学士、硕士和博士学位。1970 年到 1975 年在通用汽车公司研究实验室任研究工程师。1979 年成为宾夕法尼亚州立大学教师, 目前是机械工程教授。Turns 博士讲授热科学方面的多门课程, 并多次获得宾州大学的杰出教师奖。2009 年他获得了美国工程教育协会的 Ralph Coats Roe 奖。Turns 博士在与燃烧相关的多个领域开展研究。他是国际燃烧学会、美国航空学会、美国工程教育协会和美国汽车工程师学会的会员, 美国机械工程师学会高级会员。

书 献 予 关

此书献给

Joan Turns

-Stephen R. Turns

相对而言,人类通过洞穴中出现的第一缕闪烁的火光认识了自己的存在,感受到了自己的成功,体验了对自然的把握。在那残忍的黑暗和隐现的阴影中,火的发现象征着对化学过程的理解、蒸汽动力时代的到来和整个工业的革命。它还预示着整个人类的未来。

Loren Eiseley

The Unexpected Universe (神奇的宇宙)

第3版前言



与第1、2版一样,第3版的目的是有两个:首先是采用相对简单和易于理解的分析来介绍燃烧的基本概念;然后引入各种实际应用,并与各种理论概念相联系,以激发学习兴趣。本书既可以用于机械工程和相关领域的本科教学及作为研究生的初级教程,又可供工程师们自学。

本版的主要修改内容集中在增加和更新了有关能源利用的特定主题、环境保护及气候变化、燃料。最大的变化是增加了针对燃料的新章节。新版主要的变化和有关新增的一章的介绍如下。

第1章包括了能源、能源使用、发电和用电的更详细资料。第4章增加了新的小节,包括简化机理、催化和非均相反应。由于燃烧和污染物形成的详细化学机理变得越来越复杂,迫切需要切实有效的简化模型,而催化尾气后处理已成为电火花点火内燃机的标准污染控制方法和柴油机污染物的控制方法,某些应用也正在对催化燃烧产生兴趣。这些都是第4章增加的内容。第5章的变化主要反映了实际运输燃料的详细机理的进展,另外还包括对甲烷燃烧详细化学机理的更新(GRI Mech),以包含详细的氮化学机理,同时加了新的一节介绍甲烷燃烧和氮氧化物形成的简化机理。第9章的变化主要反映了层流非预混火焰相关的实验和模型的进展。第10章增加了有关燃气轮机燃烧室设计和运行的新的实践内容,还引用了在航天飞机和国际空间站上开展的液滴燃烧的成果。第12章的修改反映了湍流预混燃烧的最新进展。第13章的修改包括了碳烟的形成与分解的新发现,并扩充和更新了湍流非预混火焰中对火焰辐射的论述。这两章补充了几张新图和30多篇新的文献。

第15章的题目从“污染物排放”改为了“排放”,在讨论污染物排放的同时,纳入了对温室气体的论述,这两个方面同等重要。这一章加入了许多新的内容。包括但不限于:增加了一节专门讨论颗粒物对人类健康的影响以反映新的发现;为反映最新氮化学研究成果,对 NO_x 排放一节进行了修改;增加了对均质压燃发动机的论述;新增了第2版出版后排放控制新发展的论述;增加了电火花点火发动机催化转化的论述;汽油机和柴油机排放颗粒物的最新进展,主要集中在超细颗粒方面,并提供了颗粒物污染及其控制方面的论述;引入了EPA污染指数;增补与修改了 NO_x 和 SO_x 控制的论述;增加了讨论温室气体的一节。本章增加了73篇新的文献。

对于全球气候变暖、环境退化和国家能源安全连同其他问题的关注,

引起了人们对燃料的重新关注,这就需要提供燃料的一些基本资料。第17章,燃料,就是来满足这一需求的。这一章讨论了碳氢燃料、醇和其他有机化合物的命名规则和分子结构及优质燃料的物性,论述包括了传统的燃料,即不同的汽油、柴油和加热用油、航空煤油、天然气和煤,还有几种替代燃料,包括生物柴油、乙醇(玉米制备的或是纤维素制备的),来源于煤或生物质的费-托合成燃料、氢等。这一章包括8张图、22张表格和83篇文献。

第2版提供的计算机软件光盘,现在可以在出版商的网站上下载 www.mhhe.com/turns3e。网站还提供了教师解题手册和图库。

作者期待新的版本能继续为前两版本的读者服务,并希望上述的改进能让读者更好地使用本书。

Stephen R. Turns

于美国宾夕法尼亚州大学城

第2版前言

P
R
E
L
A
P
A
M

与第1版一样,第2版的目的是有两个:首先是采用相对简单和易于理解的分析来介绍燃烧的基本概念;第二是引入各种实际应用,并与各种理论概念相联系以激发学习兴趣。本书既可以用于机械工程和相关领域的本科教学,又可供工程师们自学。

作者和许多同行还发现本书可以作为研究生在燃烧学领域的初级教程。当然,本书单独使用可能无法满足这一要求,教师需要提供相应的更详细的素材和高级课题。尽管如此,许多同行利用本书还是很成功的。第2版特别为此在有些方面提供了更多及更深入的讨论。如第7章中增加了一节讨论多组分扩散和热扩散。在第7章和第8章中,还增加了包括多组分和热扩散的一维能量方程的推导,其形式与位于美国加利福尼亚州利弗莫尔的圣地亚国家实验室发展的几种火焰程序所用的形式相同。在课程中,教师可以很好地将这些程序与CHEMKIN软件结合起来使用。同样,第9章中增加了一节来讨论对冲扩散火焰。这些增加的内容不会降低本书用于更低年级的可能性。这些高级的课题相对独立,可以略过而不会影响其连续性。此外,增加的内容并不多,这样教材的总长度也没有明显的增加。本书还保持了原有通俗易懂和结构紧凑的写作风格。

第2版的变化还包括第2章中附加了一个燃料分子结构的简单讨论。这一附录对于领会第2章中许多热化学概念是很有用的,同时也为第4章和第5章中出现的化学动力学概念提供了背景知识。第4章中还增加了关于局部平衡和特征时间尺度的讨论。而第5章则加入了甲烷燃烧动力学方面的最新成果(GRI-Mech),并且引入了甲烷-空气燃烧反应途径的图解以给出甲烷燃烧动力学的清晰和完整的图像。第6章增加了一个全混流反应器化学动力学的例子,是与CHEMKIN软件联用的又一个例子。在第8章中,增加了对预混火焰结构方面的讨论,使我们对这一重要的课题有更清晰、更详细的了解。另外还专门增加了爆震一章(第16章),以满足在课堂上希望包括这一内容的要求。逻辑上讲,这一部分内容可以跟在第2章或第8章后。许多章节中还增加了习题和例题。对于那些需要用或最好用计

计算机来求解的习题进行了专门标注。配书光盘中的计算机软件也根据 Windows 操作系统的要求进行了更新。

作者希望这一新版本能继续为将本书作为基础教程的读者服务，同时本版中新增加的内容能使本书用于更高年级的课程学习。

Stephen R. Turns

于美国宾夕法尼亚州大学城

第1版前言

P
R
E
F
A
C
E

许多工科学生对燃烧和燃烧应用有很大的兴趣。尽管在许多大学中开设有燃烧或与燃烧相关的高年级课程,然而为这样的课程找一本合适的教科书却是一件难事。本书是为满足燃烧入门的课程,特别为大学生学习而设计。作者在宾夕法尼亚州立大学讲授一门燃烧导论课,并需要写出一本导论性的教科书,这两个因素促成了本书的产生。

本书最初设想的对象是机械和相关工程领域的高年级学生,其他的读者亦可发现此书为应用热学知识解决高等燃烧问题提供了桥梁。本书给出了许多实例和习题,便于读者理解或联系实际。因此,希望一年级的研究生和工程师们也可以从这些内容中获益。

在结构上,本书提供了很大的灵活性。总共 15 章的内容对于只有一个学期的课程显得太多了。本书可以满足教师在规划一门课的内容时的不同内容和组合需求,同时可以方便地使主题进行延伸或转换。以一个学期的课程为例,选择第 1~6,15,8,9 和 14 章可以组成一个最通用的课程;而如果是一门以电火花点火发动机为主的课程,则可以选第 1~6,8,12,15 和 9 章。

第 1~3 章的内容对于本科生来说是最基本的。第 1 章给出了燃烧和火焰的定义及种类,介绍了燃烧产生的大气污染物的影响与控制,这部分内容在第 15 章中有更详细的介绍。

第 2 章提供了学习燃烧所需的热化学知识。这一章强调了化学平衡对燃烧的重要性。本书光盘中的软件给学生提供了一个简便的方法来计算燃烧产物的复杂平衡。这一软件还可用于许多有趣的和辅助教学的项目训练。第 3 章介绍传质,在全书中都采用将所有的传质处理为简单的二元系统以简化理论推导的方法。除了在第 7 章中简单提到外,多元扩散的问题留给更高级的课程去讲授。这样的简化有利于没有接触过传质的学生很好地理解传质问题而不陷入其固有的复杂性。第 3 章采用了经典的斯蒂芬问题和单液滴蒸发问题来阐明传质理论。

第 4 章和第 5 章讨论化学动力学问题,首先介绍基本概念(第 4 章),然后讨论对于燃烧来说重要的化学机理和燃烧产生的大气污染物(第 5 章)。除了介绍不可避免的复杂的碳氢化合物燃烧化学外,还引入了简化的一步和多步反应动力学,并将化学动力学用于简单的分析与模型中,据此了解简化动力学的作用与缺陷。

第6章的主要内容是将化学动力学与热力学模型进行关联。导出了定压和定容反应器，全混流和柱塞流反应器四种模型。这些简化的模型可以让学生清楚地掌握化学动力学是如何用于更大的实际情形的。第6章也提供了许多用于反应器分析与设计的项目。本章的有效性和独特性相映成趣。

在前几章学习了热化学、分子输运和化学动力学后，第7章导出了在后续各章中将用到的反应系统的简化守恒方程。这一章引入了两个守恒标量的方法来简化反应流的求解问题，目的是为更严格的推导提供基础。对于本科生来说，这一章可任选，完全可以跳过去；但是对于研究生的入门课程，这一章还是很有用的。

第8~13章是对各种火焰基本问题的描述。第8章讨论层流预混火焰，第9章和第10章讨论层流非预混火焰。湍流火焰问题在第12章（预混）和第13章（非预混）中讨论，包括火焰传播、着火、灭火和火焰稳定。尽可能地采用简化的分析方法，并强调实际的应用。为了更好地理解最基本的内容，尽可能地避开了严格的数学推导。这样做有时可能对某些现象无法完全解释。对于这些情况，一般会提醒读者注意并提供相关的参考文献，以利读者能找到更完全的理解。由于这些材料很丰富，读者完全可以方便地只选择预混火焰（第8，11和12章）或只选择非预混火焰（第9，10和13章）来读。如果课程特别强调某方面的应用，可以提取特定的内容。

与实际装置有关的液滴蒸发理论属于第10章后半部分的内容，推导了一个一维蒸发控制的燃烧室模型。这一节的基本目的就是加强前面的平衡和蒸发的概念，帮助学生分析问题的能力，并提供在工程应用项目中要用到的思路与概念。设计项目可以很方便地加入到第10章的构架中。按课程的目的，第10章的这一节也是可选的。

第14章中以碳燃烧作为原型系统介绍固体的燃烧，同样使用简化的分析方法来阐释非均相燃烧的概念，并引入了扩散控制和动力控制燃烧的概念。这一章中也提到了煤的燃烧及其应用的初步概念。

在现代的燃烧学书中完全忽略燃烧产生的污染问题是不可想象的。第15章是专门针对这一问题而写的。这一章介绍污染物的定量概念并讨论了污染物产生的机理及其控制方法。这一章强调应用，对于专门的读者会有特别的吸引力。这一章在本书的位置并不意味着其不重要，这取决于课程的目标。这些素材可以跟在第1~6章后用。

最后总结一下，本书的目的是为机械工程和相近专业领域的本科高年级学生提供一个易于理解的燃烧学入门课程的教材。通过例题和作业，学生可以在他们的理解力方面和进一步应用到不同的项目和“实际世界”的问题方面产生自信心。希望这本教科书能满足教师的需求，同时也能为那些渴望获得结构简化和恰当的素材的读者，提供燃烧这一引人入胜的领域的学习入门书。

Stephen R. Turns

于美国宾夕法尼亚州大学城

致谢

许多人给这本书的各个版本提供了时间和精神上的支持。首先,我要感谢在整个过程中作出贡献的评审人。很多评审人对第3版中新的关于燃料的一章的意见,对其产生很有帮助。我的同事与朋友查克·默克勒(Chuck Merkle)在第1版的内容和教学方法两个方面都给予了持续的精神鼓励和积极宣传。在宾州大学的许多学生也用各种方式作出了他们的贡献。特别是杰夫·布朗(Jeff Brown)、李钟根(Jongguen Lee)和迈克尔先生(Don Michael)。还要特别感谢桑卡兰·温卡特斯沃伦(Sankaran Venkateswaran)提供了湍流射流火焰模型的计算。同样的还有戴夫·克兰多尔(Dave Crandall)为软件提供的帮助。穆勒先生(Donn Mueller)对第1版的所有习题进行了艰苦的求解工作。我还要感谢我在奥本大学的同事与朋友,在我学术休假期间欢迎我与他们共度:Sushi Bhavnani, Roy Knight, Pradeep Lal, Bonnie MacEwan, Tom Manig, P. K. Raju 和 Jeff Suhling。还要感谢气体研究所(现为气体技术研究所)多年来对我研究工作的支持,这些研究作为写作本书提供了最初的灵感和动力。谢丽尔·亚当斯(Cheryl Adams)和玛丽·纽比(Mary Newby)帮助抄写手稿、修改草稿,从而形成了最终的原稿。我对她们的恩惠感恩不尽。还要感谢来自 McGraw-Hill 的 Bill Stenquist 和 Lora Neyens 的支持和帮助。对于我来说,最宝贵的是来自家人的坚定支持,他们惊人地容忍着我将周末和假期的时间花费在写作上,这些时间本来是应该与他们在一起度过的。超过40年的妻子和朋友 Joan,对于我和我的事业给予了不倦的支持,对此我永远感激。谢谢你,Joan。

常用元素的相对原子质量(1981 年)

铝	Aluminum	Al	26.9815
氩	Argon	Ar	39.948
铍	Beryllium	Be	9.012 18
硼	Boron	B	10.81
溴	Bromine	Br	79.904
钙	Calcium	Ca	40.08
碳	Carbon	C	12.011
氯	Chlorine	Cl	35.453
铜	Copper	Cu	63.546
氟	Fluorine	F	18.9984
氦	Helium	He	4.002 60
氢	Hydrogen	H	1.007 94
氪	Krypton	Kr	83.80
镁	Magnesium	Mg	24.305
氮	Nitrogen	N	14.0067
氧	Oxygen	O	15.9994
铂	Platinum	Pt	195.08
硅	Silicon	Si	28.0855
钠	Sodium	Na	22.9898
硫	Sulfur	S	32.06
氙	Xenon	Xe	131.29

物 理 常 数^①

阿伏伽德罗常数	Avogadro number	N_{AV}	$(6.022\,136\,7 \pm 0.000\,003\,6) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
玻耳兹曼常数	Boltzmann constant	k_{B}	$(1.380\,658 \pm 0.000\,012) \times 10^{-23} \text{ J/K}$
普朗克常量	Planck constant	h	$(6.626\,075\,5 \pm 0.000\,004\,0) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
真空中的光速	Speed of light in vacuum	c	$299\,792\,458 \text{ m/s}$
标准重力加速度	Standard acceleration of gravity	g	$9.806\,65 \text{ m/s}^2$
标准大气压	Standard atmosphere	atm	$101\,325 \text{ Pa}$
斯蒂芬-玻耳兹曼常数	Stefan-Boltzmann constant	σ	$(5.670\,51 \pm 0.000\,19) \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
通用气体常数	Universal gas constant	R_{u}	$(8314.510 \pm 0.070) \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$

^① 摘自 E. R. Cohen and B. N. Taylor, "The Fundamental Physical Constants" *Physics Today*, August 1993, pp. 9-13.

换算系数

量的名称	单位符号	换算系数
能量	J	$1\text{J} = 9.478\ 17 \times 10^{-4}\text{Btu}$ $= 2.3885 \times 10^{-4}\text{kcal}$
功率	W	$1\text{W} = 3.412\ 14\text{Btu/h}$
力	N	$1\text{N} = 0.224\ 809\text{lbf}$
热流量	W/m^2	$1\text{W/m}^2 = 0.3171\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2)$
运动黏度和扩散系数	m^2/s	$1\text{m}^2/\text{s} = 3.875 \times 10^4\text{ft}^2/\text{h}$
长度	m	$1\text{m} = 39.370\text{in} = 3.2808\text{ft}$
质量	kg	$1\text{kg} = 2.2046\text{lb}$
质量密度	kg/m^3	$1\text{kg/m}^3 = 0.062\ 428\text{lb} \cdot \text{ft}^3$
质量流量	kg/s	$1\text{kg/s} = 7936.6\text{lb/h}$
压力	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ $= 0.020\ 885\ 4\text{lbf/ft}^2$ $= 1.4504 \times 10^{-4}\text{lbf/in}^2$ $= 1.4504 \times 10^{-4}\text{psi}$ $= 4.015 \times 10^{-3}\text{inHg}$ $= 2.953 \times 10^{-4}\text{inHg}$ $1 \times 10^5\text{N/m}^2 = 1\text{bar}$
比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$1\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 2.3886 \times 10^{-4}\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$
温度	K	$1\text{K} = (5/9)^\circ\text{R}$ $= (5/9)(^\circ\text{F} + 459.67)$ $= ^\circ\text{C} + 273.15$
时间	s	$3600\text{s} = 1\text{h}$

目 录

CONTENTS

第1章 导论	1
1.1 学习燃烧学的动机	1
1.2 燃烧的定义	8
1.3 燃烧方式和火焰种类	8
1.4 学习方法	10
1.5 参考文献	10
第2章 燃烧与热化学	12
2.1 概述	12
2.2 热力参数关系式回顾	12
2.2.1 广延量和强度量	12
2.2.2 状态方程	13
2.2.3 状态的热方程	13
2.2.4 理想气体混合物	15
2.2.5 蒸发潜热	16
2.3 热力学第一定律	17
2.3.1 第一定律——定质量	17
2.3.2 第一定律——控制体	18
2.4 反应物和生成物的混合物	19
2.4.1 化学计量学	19
2.4.2 绝对(或标准)焓和生成焓	23
2.4.3 燃烧焓和热值	25
2.5 绝热燃烧温度	28
2.6 化学平衡	32
2.6.1 第二定律的讨论	32
2.6.2 吉布斯函数	33
2.6.3 复杂系统	38
2.7 燃烧的平衡产物	39
2.7.1 全平衡	39
2.7.2 水煤气反应的平衡	40