



能源动力类系列教材

Mc
Graw
Hill

Education

对流传热与传质

第4版
中文版

Convective Heat and Mass Transfer (Fourth Edition)

[美] WILLIAM KAYS / MICHAEL CRAWFORD / BERNHARD WEIGAND 著
赵镇南 译



高等教育出版社
Higher Education Press

对流传热与传质

第4版 中文版

Convective Heat and Mass Transfer

Fourth Edition

W. M. Kays

M. E. Crawford 著

B. Weigand

赵镇南 译

高等教育出版社

图字:01-2005-2295

William Kays, Michael Crawford, Bernhard Weigand

Convective Heat and Mass Transfer, Fourth Edition

ISBN:0-07-246876-9

Copyright © 2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Higher Education Press.

本书中文简体字翻译版由高等教育出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

对流传热与传质:第4版/(美)凯斯(Kays,W.)等著;赵镇南译.

—北京:高等教育出版社,2007.7

书名原文:Convective Heat and Mass Transfer: Fourth Edition

ISBN 978-7-04-021806-0

I. 对… II. ①凯… ②赵… III. ①对流传热-研究生-教材②传质-研究生-教材 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 071192 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
			http://www.landaco.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印 刷	北京民族印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2007 年 7 月第 1 版
印 张	31.25	印 次	2007 年 7 月第 1 次印刷
字 数	580 000	定 价	35.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21806-00



内 容 简 介

W. M. Kays, M. E. Crawford 以及 B. Weigand 教授所著《对流传热与传质》是对流传热与传质领域世界级的经典权威著作,本书根据该书第 4 版翻译而成。

本版不仅保持了该书叙述推导严谨、分析透彻的一贯风格,而且在内容上更加丰富。本书把动量传递、热量传递和质量传递有机地结合在一起,以使读者对表面摩擦和热、质传递之间以及相应的动量场、热量场和质量浓度场之间的关系有更深入的理解。本书特别强调深刻理解对流传热传质问题物理本质的重要性,并正确理解分析解,包括近似分析解与数值解之间的关系。

全书共分 20 章。第 1~3 章介绍一般性基础理论;第 4、5、6 章分别介绍层流和湍流边界层微分方程以及边界层积分方程;第 7~10 章介绍层流内部流动、外部流动的动量传递和热量传递;第 11~14 章介绍相应的湍流动量和热量传递,第 15、16 章分别介绍变物性影响和高速流动传热;第 17 章介绍自然对流传热;第 18~20 章介绍对流传质,特别增加了工程应用实例分析。

本版引入了数值计算工具 TEXSTAN,并在第 7~14 章中附有若干需要用软件求解的习题。

本书可作为能源动力、核热工、化工与制药、航空航天、交通运输、环境、武器等类专业的研究生教材和参考书,也可供上述专业领域内的工程技术人员参考。

译者序

2004年9月,教育部高等学校能源动力学科教学指导委员会在武汉开会期间,麦格劳-希尔教育出版公司驻北京代表处的代表向我征询在能源动力学科领域内,有哪些特别优秀的国外教材值得译成中文并在国内出版,我当即推荐由W. M. 凯斯教授等人合著的《对流传热与传质》(第四版)。在随后的几个月中,经高等教育出版社与麦格劳-希尔教育出版公司接洽协商,顺利地签订了版权转让协议,使这本名著的最新版本得以在国内出版发行。

凯斯教授的《对流传热与传质》第一版问世于1966年,随后分别在1980年和1993年与M. E. 克拉福德教授合作完成了第二、三版。本书第四版又增加了第三作者B. 威甘德教授。

W. M. 凯斯教授等人合著的《对流传热与传质》一书在全世界享有盛誉,被学术界公认为对流传热传质领域研究生教材中的经典权威之作。

与国内读者比较熟悉的第二版(陈熙、翟殿春译,1986年,科学出版社)相比,第四版不仅保持了叙述推导严谨和分析透彻的一贯风格,而且内容更加丰富,编排上也有相当大的变化,主要的修改包括:将湍流边界层微分方程独立为一章;在湍流外部边界层的动量传递一章中增强了介绍湍流模型的内容,还增加了自由流中湍流的影响一节;湍流外部边界层的热量传递,即第12章是内容变化最大的一章,增写了变主流速度近似解、强加速边界层、全覆盖薄膜冷却,以及压力梯度、轴向曲率、自由流湍流的影响共6节;流体变物性影响一章增加了液体外部流动层流和湍流时的分析;对讲述质量传递的三章做了全面改写,对不同传质速率做了严格区分并分别对待之,因此新增了5节内容,在应用实例部分新增对一般求解方法的介绍以及蒸发一节。以上的变化仅仅是指内容编排方面,至于每一节具体内容方面的变化,这里不可能详细介绍,读者可以自行比较。

内容上的这些变化,集中体现了二十多年以来对流传热传质领域研究取得的新进展。虽然传热传质不像一些新兴学科那样变化迅速,面貌日新月异,但正如原作者在序言中所说的,它展现了“变化与恒久”并存的格局,也就是传统和创新相结合的发展格局。

需要特别说明,本书第四版引人注目的一个创新,或者称之为“亮点”的,是特别强调了数值计算工具的应用,并为此在教材中引入了边界层数值计算工具TEXSTAN软件。该软件是几位作者以及他们的研究生历经几十年研究成果

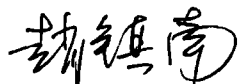
的结晶,现在无偿提供给全世界的学术研究界。本书从第7章至第14章,均附有需采用 TEXSTAN 软件求解的习题。书末的附录 F 对该程序的由来、数值计算模型以及模型的处理做了详细介绍;附录 G 给出了一个示例程序输入数据组的结构;附录 H 给出了 TEXSTAN 中包含的大量数据组的分类明细。为了帮助读者理解并掌握各种几何形状条件下软件的应用,这3个附录也已经全文译出。

麦格劳-希尔公司为使用本书的教师提供以下电子邮箱,以便获取相关的教辅材料:instructorchina@mcgraw-hill.com。

进入21世纪以来,国内工程热物理、热能工程、空调与制冷等专业研究生的培养规模和20世纪80年代相比已经增长了很多倍。希望这本在全世界享有很高声誉的优秀教材能够在新世纪未来的10年、20年中为中国研究生教育的发展和青年教师的进修提高做出贡献。

需要说明,因为原文中部分物理量的符号和术语与我国习惯不一致,在译稿中已经根据我国国家标准做了改动,请参见书末的附录 I。

本书的翻译、审稿和修改历时近两年。译稿由黄素逸教授审阅,审阅人提出了很好的意见,谨在此表示衷心的感谢。读者若发现译稿中有错误和疏漏之处,欢迎直接来函:zn-zhao@tju.edu.cn。



于天津大学新园村

2007年4月

作者简介

W. M. 凯斯 (William M. Kays) 斯坦福大学机械工程荣誉退休教授。1951 年获斯坦福大学机械工程哲学博士学位,并在斯坦福大学度过了全部职业生涯。1961—1972 年担任机械工程系主任,1972—1984 年担任工程学院院长。美国国家工程院院士,美国机械工程学会会员。在紧凑式热交换器的换热表面以及湍流边界层换热方面做了广泛的研究工作,是《紧凑式换热器》一书的作者之一。

M. E. 克拉福德 (Michael E. Crawford) 奥斯汀德克萨斯大学机械工程教授。1976 年获得斯坦福大学机械工程博士学位,此前的学位均在亚里桑那州立大学获得。1980 年进入德克萨斯大学执教,1995—2001 年作为副主任曾在多个系任职。主要讲授本科生的传热学、热力学,以及研究生的对流换热课程。研究项目包括液态金属的磁流体动力学、二元溶液固化、燃气轮机的薄膜冷却,因旁路引发流态转变的湍流建模以及因尾流引起流态转变的建模。是边界层数值模拟程序 STAN5 及其后续程序 TEXSTAN 的作者。美国机械工程学会会员和德克萨斯州的注册教授工程师。目前致力于工程多样文化人员动态领域的研究工作。

B. 威甘德 (Bernhard Weigand) 德国斯图加特大学教授,宇航热力学研究所所长。1992 年获达姆施达特大学博士学位,并于 1997 年获得达姆施达特大学的矿山投资学位。1992—1999 年受雇于瑞士 ABB 电力总公司,从事传热和燃气轮机叶片冷却的基础研发和下一代叶片的传热和冷却设计。1999 年进入斯图加特大学,并从 2002 年起一直担任该校宇航工程学院院长。教学工作主要集中在热力学和传热学。目前正在从事燃气轮机传热的数值和实验研究、相变问题和液滴动力学研究。

第四版序言

本书第三版问世已有 10 年。10 年中,在研究生水平的对流传热传质领域里变化与恒久并存。一个重要的改变是我们有了一位新合作者——B. Weigand,他毕业于德国达姆施达特大学,目前是斯图加特大学教授、航天热力学研究所所长。

正如上课时经常做的那样,我们在书中给出了一定数量的能够促进对流问题近似分析解思路的习题。举个例子,像经典的未加热起始段问题,只要恰当地完成积分变换,运用伽马函数和贝塔函数就不难求得它的积分解,而且所得结果比较简洁、直观。这和所说的变化有什么关系?从 20 世纪 90 年代初期到中期,研究生们开始做严格的数值解,好像根本没有想过用解析积分进行求解。若两种方法都用过的话,其实他们所做的积分很容易转换成数值积分。这与研究生的工程教育正在逐步远离高等数学的情况似乎是一致的。实际上,用数值解常常能够既容易又经济地获得有价值的、但有时不是刻意想得到的结果。

刚刚进入研究生对流(换热)课程的学生已经了解如何利用求解对流换热表面传热系数的关联式解决传热和传质中的问题,他们大多把学习重点放在如何明智地选用这些关联式上。对于很多类型的工程问题,这种“手册式的方法”只能做到数量级估计,但是对表面摩擦和热、质传递之间以及相应的动量场、热量场和质量浓度场间的关系却理解得非常不够。而湍流又使得这种理解变得更加复杂。

当我们在课堂上力图把学术上的对流与“现实世界”中的传热传质问题联系在一起的时候,会发现由于温度差很大或者流速极高,经常需要把注意力集中在各种复杂的热边界条件和变物性效应上。这些情况再加上三维效应,常常使问题超出手册式分析方法能够求解的范围。无论我们采用何种方法来解决这些现实世界的问题,求解的格式都是相同的:需要基于若干项假设建立针对某个问题的模型来求解该问题,然后把所得到的结果与现实世界中的情况进行对比。为了得到一个对流问题的解,需要利用各种对流的工具,包括近似分析或者精确分析、通过计算机编程进行数值分析、物理实验和数据分析,还需要包含在热-质-动量比拟中的重要概念。

如果传热工程师们选择采用计算机编程数值方法作为解决某个给定问题的适宜工具,他们会面对很多项挑战。他们要理解编程的规则以及编程中需要哪

些假设。在一定程度上,他们需要在开始寻找答案以前就知道结果的基本趋势。如果选择了数值求解方法,他们就会很注意这种选择在时间和金钱方面的花费。通常,一种对时间-金钱成本的简单选择就可以得到与高得多的时间或金钱几乎一样的结果(10分钟分析对10小时分析)。

数值实验与物理实验之间存在着很强的相似性,对其中一个的研究会增强对另一个研究的有效性。无论对哪一类实验都存在两个基本的要求:数值或物理工具必须要经过验证,使用工具的人也需要“经过验证”。同时,为了证明其可信无论哪一种实验的结果都需要进行检验,还必须对所获得的相关数据做不确定性分析。对使用人的验证通常可以采用让他(她)去做若干基准实验,并将所得数据和标准结果进行比较。在理想情况下,从近似方法或分析方法可以得出一类问题的基准结果和“已被接受”的数值或实验数据。可以利用充分发展的(管内)换热数据或者布劳修斯/福克纳-斯坎方程数据或者湍流时的解,作为对流方面验证使用者的例子。最终结果是使用者懂得怎么样才不会误用那些工具。对工具的验证要求使用者理解工具的限制,针对数值工具要理解包含数字的程序编码中融入了一些什么物理机制。这是一项特别重要的检验,因为对商业程序而言,经验表明广告上所说的并不等同于对该程序总是能被正确执行的承诺。最终结果是使用者得到了怎样才能使工具方面的限制与模型的假设相匹配的信心。

P. K. 斯特恩教授^①是机械实验装置方面受到高度尊重的大师之一。在漫长的职业生涯中,他发展了一种用于测量系统的统一方法,他相信人们能够为了得到“针对某个目的的正确数据”去开发各种知识。我们把他的思路加以扩展并应用到数值对流传热传质领域,这和在用于求解对流问题以前就需要对工具以及工具的使用者进行验证的思想是一脉相承的。就这一点来说,数值实验与物理实验之间的相似性使他们走到了一起。

本版教材的一个创新是更多地强调了数值工具的运用,我们还特别把重点放在了TEXSTAN上,这是一个用于求解二维对流传热和传质边界层问题的教学程序。本书配有已编译程序(连同扩展的实验数据和输入手册),可以免费提供给全世界的科学研究界。我们希望,通过把对流传热传质研究与数值解结合起来,能够增强对表面摩擦、热质传递及其相关流场之间相互关系的理解。

根据评审人的意见,本版的另一项更新是增加了体积力作用下对流传热的内容。本版的传质一章做了全面改写,包括了更多低的和高的传递速率情况下的工程实例。通过重写这些章节,我们希望能向读者提供更多对表面上看起来

^① 通过以下网址:<http://home.globalcrossing.net/~meas-sys/index.html> 可以与 P. K. 斯特恩教授取得联系。

较难问题的洞察力。

我们注意到在本版中已经把关于热交换器的两章撤掉了,这是因为考虑到在凯斯教授和伦敦教授^①再版的经典教材中可以找到许多这方面的内容。

我们要感谢以下评阅人对本书第四版所给出的反馈意见:路易斯安那州立大学的 S. 阿沙亚,路易斯安那州立大学的 S. 埃凯德,佛罗里达技术学院的 P. 苏,新墨西哥大学的 J. R. 雷斯,亚利桑那州立大学的 R. P. 罗伊,弗吉尼亚技术学院的 B. 维克以及波士顿大学的 D. 乌罗勃列夫斯基。

作为合著人之一的 B. Weigand 对于和斯图加特大学的 J. von 沃尔佛斯多夫教授就本教材所作的很多有益的讨论表示衷心感谢。

W. M. Kays
M. E. Crawford
B. Weigand

^① Kays. W. M., A. L. London. 紧凑式热交换器. 3 版. Krieger 出版公司·梅尔波恩, 佛罗里达, 1984.

第一版序言(1966)

二战之前,对流传热传质基本上是一门经验科学,几乎无一例外地要靠由量纲分析归纳出来的实验数据才能完成工程设计。但在过去的20年中,对流分析方法方面已经取得了巨大的进展,以至现今的实验更多地被认为是扮演检验理论模型是否正确的典型角色。这并不是说直接的实验数据对工程设计已经不那么重要,但是毫无疑问,完全依赖直接实验数据的现象已经大大减少了。正是这种变化极大地增强了我们对对流现象的理解,我们发现自己能够充满自信地应付那些如果用实验将既费时又费钱的问题。本书就是为了回应这种趋势而写的。

工科学生理所当然地应该学会从基本原理出发进行推理,只有这样他(她)在面对新问题的时候才不会不知所措。但如果解已经存在,仍从基本原理出发求解一个复杂问题就会浪费很多时间。分析解因其自身的特性常常显得冗长和困难,因此熟悉并理解现有对流分析解中某些很重要的东西应该成为传热工程师的一个主要背景。本书的目的之一就是把若干边界层问题的解以简捷可用的形式汇集到一起。尽管这些问题在现有的传热文献中都能找得到,但对于从事实际工作的工程师来说,却并非总是唾手可得,时间对这些工程师是很重要的。

作者认为,按照一种合乎逻辑的顺序研究这些解能够给学生提供理解对流传热传质问题的最佳途径。由此希望本书既能够作为教材也能够成为工程师的有用参考书。

本书是从作者最近10年间对一年级研究生的一年期传热课程的对流部分增补讲稿中派生出来的。学习该课程的学生大多数是机械、核能和航天工程师,他们会涉及热能动力系统以及热环境控制方面的问题感兴趣。

我们设想学习本书的学生已经具备了本科应用热力学、流体力学和传热学的背景。尽管不是强制性的,但传热学在学生确定思考问题的方向以及为更加深入地研究课题建立一种需要意识方面常常很有帮助。尤其是如果对计算对流传热速率的常用经验方法很熟悉的话,学生就会对传热系数和掌握对流传过程基本物理机制的用处做出正确评价。

本书对内容的选取直截了当地反映了作者本人的兴趣,而每个题目的讲述深度则体现了对大约在一个学期(或许两个学季)内能够讲完所必须做的妥协。将会发现动量边界层的内容被大大压缩了,只留下为讲述传热传质所必需的材

料。希望巩固边界层理论的学生无疑应该选修粘性流体力学的内容,这方面的适宜教材不难找到。实际上对流传热传质方面的材料远比这里给出来的多,不仅是已考虑的问题,也包括未涉及的内容。关于后一方面的问题有自然对流、热交换器理论、旋转表面、非稳态流动、两相流、沸腾和凝结、非牛顿流体、内部辐射气体、稀薄气体、磁流体动力学以及传热传质的耦合问题。可能这正好能说明为什么书的第二版总是要比第一版更厚。

最后,我要对一些同事表示感谢,没有他们的帮助这本书是不可能完成的。首先是 A. L. 伦敦教授,是他教会我如何去教学,引领我进入传热之门,并始终是帮助和激励我的源泉。W. C. 雷诺教授在一些研究项目上一直与我合作,这些工作已经总结到本书中,还有一些重要部分属于他个人研究工作的成果。与伦敦帝国学院的 D. B. 斯帕丁教授一起度过的几个月是我难得的荣幸,在本书中到处都能看得到他的影响。特别是斯帕丁教授对对流传质问题的概括构成了本书最后三章的全部基础。虽然斯帕丁教授的很多论文中有,但我仍希望把这些内容写入本书将有助于使它得到更广泛的利用。最后,我要对莫法特先生(R. J. Moffat)表示感谢,他通读了书稿并提出许多有益的建议。

W. M. 凯斯

符 号 表

英文字母

A^+	范·德瑞斯特常数
A_c	流动的横截面积, m^2
A_s	表面积, m^2
a	分子热扩散率, $k/(\rho c)$, m^2/s
B	质量传递的驱动力
B_f	发散参数
B_h	传热发散参数
Bo	波兴涅斯克数, $Gr Pr^2$
Br'	布林克曼数, $V^2 \mu / (q_s D)$ 【原文书写有误——译者注】
b_f	发散参数
b_h	发散参数
C	流动方向上的表面曲率, $1/R$, m^{-1}
C_D	阻力系数
Cr	$\nu/u_\infty R$, 曲率参数
c	比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; 物质的量浓度
c_f	局部摩擦系数
c_{fm}	相对于长度的平均摩擦系数
c_{fapp}	表观平均摩擦系数
c_{f0}	具有极小传质速率的局部摩擦系数值
c_V	比定容热容, $J/(kg \cdot K)$
c_j	混合物中组分 j 的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$
D	圆管道的内径, m
D_h	水力直径, $D_h = 4A_c L/A$, m
D_j	多元混合物中组分 j 的质扩散系数, m^2/s
d	圆管道的外径, m
D_{ij}	二元混合物的质扩散系数(注意 $D_{ij} = D_{ji}$), m^2/s
$\dot{E}$	因对流方式跨越控制表面导致的能量传递速率, $W(J/s)$
e	内热能与化学能, J/kg

II 符号表

F	质流量比, $\dot{m}/G_\infty$
F	作用在控制体积上的所有外力之合力, N
G	质流量, 或质量速度, ρu , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 克劳瑟 (Clauser) 形状因子
G_∞	自由流中的质量速度, ρu_∞ , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
G	流场中任意点的质流量, 或质量速度矢量, ρV , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
G_x, G_y, G_z	质流量矢量的分量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$G_{\text{diff}, j}$	组分 j 因扩散传递的质流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Gr_x	局部格拉晓夫数, $g\alpha_V(T_s - T_\infty)x^3/\nu^2$
Gr_x^*	修正的格拉晓夫数, $g\alpha_V q_s x^4/k\nu^2$
Gr_D	基于直径的格拉晓夫数
Gr_L	基于 $L = \text{表面积}/\text{表面周长}$ 的格拉晓夫数
g	传质系数, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; 重力加速度, m/s^2
g_i	焓传递系数, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
g^*	质量传递速率小时的传质系数数值, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$
H	边界层形状因子
H_0	单位质量燃油在参考温度 T_0 时的燃烧热, J/kg
h	对流换热表面传热系数, 或者对流热导, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_k	粗糙面对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
i	静态焓及混合物焓, $e + P/\rho$, J/kg
i'	静态焓的脉动分量, J/kg
$\bar{i}$	静态焓的时均值, J/kg
i_j	混合物中组分 j 的分焓, J/kg
i^*	滞止焓, $i + u^2/2$, J/kg
$\bar{i}^*$	时均滞止焓, J/kg
i_R	计算流体物性用的参考焓, J/kg
K	加速度参数
K_p	平衡常数
k	湍动能的瞬时值, $u'_i u'_i / 2$, m^2/s^2 ; 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
k'	k 的脉动分量, $k' = k - \bar{k}$, m^2/s^2
$\bar{k}$	k 的时均值, $\overline{u'_i u'_i} / 2$, m^2/s^2
k_{eff}	$k + k_t$
k_s	当量“沙粒”粗糙度, m
k_t	涡漩或湍流导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

k_T	热扩散比
L	管道流程长度, m
L^*	特征长度
Le_j	刘易斯数, $\gamma_j/\Gamma, Pr/Sc_j$ (有时定义为此式的倒数)
l	混合长, m
l_t	湍流长度尺度, m
M	喷注速率参数; 摩尔质量, g/mol
Ma	马赫数
m	质量, kg; 指数
$\dot{m}$	表面或相界面上的总质量通量(单位面积上的质量流率), kg/(m ² · s)
$\dot{m}_j$	表面或相界面上物质 j 的质量通量, kg/(m ² · s)
$\dot{m}_j'''$	单位体积中因化学反应导致的物质 j 的产率, kg/(m ³ · s)
n_α	混合化合物中元素 α 的质量分数
$n_{\alpha,j}$	复合物质 j 中元素 α 的质量分数
Nu	努塞尔数, $hD/k, 4r_h h/k, hD_h/k, xh/k$
p	压力, Pa
p_a	气体混合物中物质 a 的分压, Pa
p'	压力的脉动分量, Pa
$\bar{p}$	压力的局部时均值, Pa
P	管道的周长, m
p^+	无量纲压力梯度(壁面坐标)
$\varnothing$	第二类守恒性质
Pe	贝克来数, $Re Pr$
Pe_t	湍流贝克来数, ϵ_M/ν
Pr	普朗特数, $\mu c/k, \mu/\Gamma, \nu/\alpha$
Pr_{eff}	$\mu_{eff}/(k_{eff}/c)$
Pr_t	湍流普朗特数
Q	热量, 因温度梯度而传递的能量, J
q	热流密度矢量, 单位面积上的传热速率, W/m ²
q_m	质量流量, kg/s
q_s	热流密度, 在表面或相界面单位面积上的传热速率, W/m ²
R	摩尔气体常数, J/(mol · K); 回转体的半径, 圆柱或球体的半径, m; 流动方向上的曲率半径, m
Ra	瑞利数, $Gr Pr$

IV 符号表

R_g	气体常数, $J/(kg \cdot K)$
Ri	理查森数, $(u/R)/(du/dR)$
r	圆柱坐标系或球坐标系中的径向距离, m; 边界层厚度比, Δ/δ ; 简单化学反应中氧化剂与燃料的质量比
r_c	恢复系数
r_h	水力半径, $A_c L/A$, m
r_i	环形夹层的内半径, m
r_o	环形夹层的外半径, m
r_s	圆管的半径, m
r^+	无量纲径向坐标, r/r_s
r^*	r_o/r_i , 环形夹层的半径比
Re	雷诺数, $4r_h G/\mu, DG/\mu, xu_\infty \rho/\mu, xu_\infty/\nu, \delta_2 u_\infty/\nu, \Delta_2 u_\infty/\nu$
Re_k	粗糙度雷诺数, $k u_\tau/\mu$
Re_t	湍流雷诺数
S	控制体积中的能量源, J
S	源函数, 单位体积所产生的热能, W/m^3
S_{ij}	应变速率张量, s^{-1}
Sc_j	施密特数, $\mu/\gamma_j, m/(\rho D_h)$
Sc_k	湍流动能扩散施密特数
Sc_e	湍流耗散扩散施密特数
Sh	舍伍德数, gx/γ
St	斯坦顿数, $h/Gc, h/(u_\infty \rho c)$
St^*	传质速率极小时的局部斯坦顿数
St_k	粗糙度斯坦顿数
s	熵, $J/(kg \cdot K)$
T	温度, K; 边界层形状因子
T_R	计算流体物性的参考温度, K
Tu	湍流强度
T'	温度的脉动分量, K
$\bar{T}$	温度的时均值, K
$\overline{T'v'}$	表观湍流热流量, $K \cdot m/s$
T_{aw}	绝热壁面温度, K
T_e	管道入口处的流体温度, K
T_m	流体混合平均温度, K

T_s	表面或相界面处的流体温度, K
T_∞	边界层外缘处自由流的温度, K
T^*	滞止温度, K
T_{db}	干球温度, K
T_{wb}	湿球温度, K
T^+	壁面坐标的无量纲温度
u	x 方向的速度分量, m/s
u'	x 方向的速度脉动分量, m/s
$\bar{u}$	x 方向的时均速度, m/s
u_c	管轴线上的速度, m/s
$\overline{\rho u'v'}$	二维边界层的湍流切应力, N/m ²
$\overline{u'X'}$	湍流速度-体积力关系式, N/(s · m ²)
u_i, u_j	张量表示法中的广义速度, m/s
$\overline{\rho u'_i u'_j}$	湍流应力张量或者雷诺应力张量, N/m ²
$\overline{\rho u'_j i'}$	焓通量矢量, J/(s · m ²)
u^+	壁面坐标下的无量纲速度; 管内无量纲速度, u/V
u_τ	“剪切速度”或者“摩擦速度”, m/s
u_∞	边界层外缘的自由流速度, m/s
V	体积, m ³ ; 管内流体的平均速度, m/s; 钝体上游的均匀速度, m/s
$\mathbf{V}$	速度矢量, m/s
$\mathbf{V}'$	湍流流动中速度矢量的脉动分量, m/s
$\bar{\mathbf{V}}$	速度矢量的局部平均值, m/s
v	y 方向的速度分量, m/s
v'	y 方向的脉动速度分量, m/s
$\bar{v}$	y 方向的局部时均速度, m/s
$\overline{\rho c v' T'}$	二维边界层的湍流热流通量, J/(s · m ²)
v	流体的比体积, m ³ /kg
v_s	流体在表面的法向速度, m/s
v_s^+	壁面坐标中 v_s 的无量纲形式
v_r	r 方向的速度分量, m/s
W	机械功或电力功, J(N · m)
$\dot{W}$	做机械功的速率, W(J/s)
w	z 方向的速度分量, m/s