

传热学应用手册

(上册)

(美) W. M. 罗森诺 等 主编



科学出版社

传热学应用手册

(上册)

[美] W. M. 罗森诺 等 主编

谢 力 译

蒋章焰 校

科学出版社

1992

传 热 学 应 用 手 册

(下 册)

[美] W. M. 罗森诺 等 主编

谢 力 译

蒋章焰 校

科 学 出 版 社

1 0 0 2

(京)新登字092号

内 容 简 介

本书是1985年出版的《传热学手册》第二版的中译本。为适应当代新科技发展的需要和反映传热学的最新成果,新版扩充为两本手册:《传热学基础手册》和《传热学应用手册》。这两本手册既可独立使用,又可配套对照使用。原书主编是国际上公认的权威工程热物理学家,各章的作者也都是在他们所从事的分支领域中卓有成就的权威学者,因而这一套新的手册是传热学领域的权威性手册,它将能满足有关科技人员未来许多年内的需要。本书共十二章,分上、下两册出版。上册内容包括传质冷却、非牛顿流体、强化传热、换热器和热管,下册内容包括流态化和填充床、太阳能、蓄热、冷却塔、地热利用以及温度测量和传热测试等。本书的特点是内容精炼全面、数据实用可靠、查阅使用方便。

本书的主要读者对象是在动力、化工、航空、电力、冶金、核能、航天、电子、建筑以及生物制药和食品工程等方面从事传热工作的科技人员,以及高等学校有关专业教师和高年级学生。

Warren M. Rohsenow et al. (Eds.)

HANDBOOK OF HEAT TRANSFER APPLICATIONS

Second Edition

McGraw-Hill, 1985

传 热 学 应 用 手 册

(上 册)

〔美〕W. M. 罗森诺 等 主编

谢 力 译

蒋章焰 校

责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1992年3月第一次印刷 印张:28 1/2 插页:2
印数:1—2 200 字数:659 000

ISBN 7-03-002594-6/TB·82

定价:28.70 元

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是1985年出版的《传热学手册》中译本的第二版。为适应当代科技发展的需要和反映传热学的最新成果,新版扩充为两本手册:《传热学基础手册》和《传热学应用手册》。这两本手册既可独立使用,又可配套对照使用。原书主编是国际上公认的权威工程热物理学家,各章的作者也都是在他们所从事的分支领域中卓有成就的权威学者,因而这一套新的手册是传热学领域的权威性手册,它将能满足有关科技人员未来许多年内的需要。

本书共十二章,分上、下两册出版。上册内容包括传质冷却、非牛顿流体、强化传热、换热器和热管,下册内容包括流态化和填充床、太阳能、蓄热、冷却塔、地热利用以及温度测量和传热测试等。本书的特点是内容精炼全面、数据实用可靠、查阅使用方便。

本书的主要对象是在动力、化工、航空、电力、冶金、核能、航天、电子、建筑以及生物制药和食品工程等方面从事传热工作的科技人员,以及高等学校有关专业的教师和高年级学生。

Warren M. Rohsenow et al.(Eds.)

HANDBOOK OF HEAT TRANSFER APPLICATIONS

McGraw-Hill, 1985

传 热 学 应 用 手 册

(下 册)

【美】W. M. 罗森诺等 主编

谢 力 译

蒋章焰 校

责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年3月第一版

1992年3月第一次印刷

印数:1—2 200

开本:787×1092 1/16

印张:22 1/2 插页:2

字数:528 000

ISBN 7-03-002595-4/TB·83

定价:23.50 元

中译本出版前言

《传热学基础手册》和《传热学应用手册》英文原版是美国 McGraw-Hill 图书公司 1985 年出版的,这两本书是 1973 年出版的《传热学手册》(科学出版社于 1985 年出版了中译本)的第二版。新版包括了近 10 多年来传热学的最新成果。每个专题都是由当代权威学者执笔,将主要成果和最新资料作了准确简明的归纳。与老的版本相比,全书 60% 以上的篇幅都是全新的内容,而其余的内容也都重新编写,以适应当代新科技发展的需要。在编写安排上,《传热学基础手册》和《传热学应用手册》既可独立使用,又可配套对照使用。

从汽车到电子计算机,从供暖设备到航天飞机,几乎所有的装置都会有各种类型的传热问题有待解决。这套新的权威性手册是为解决这些实际问题而编写的。例如,书中介绍了超级计算机大面积集成电路及部件的最新冷却方法,讨论了固体内瞬间加热时温度场的变化规律,也提出了宇宙飞船热辐射的计算方法等。

《传热学基础手册》着重讨论传热问题的理论解和数值解,给出热物理性质表,分析导热和热辐射的定律,提供对流换热实验数据,讨论沸腾、凝结和两相流的规律等。在《传热学应用手册》里,详尽地介绍了传热学在新科技领域中的应用基础知识和设计资料。其内容包括传质冷却、非牛顿流体、强化传热、换热器、热管、流态化和填充床、太阳能、蓄热、冷却塔、地热利用和温度测量等。全套书采用了统一的符号表,计算结果和实验数据采用了国际单位制单位。

这套新的手册是专门为从事传热工作的工程技术人员、科研工作者、教师和高年级学生编写的。该书的特点是内容精炼可靠、数据实用和使用方便。它为解决复杂传热问题提供了公认的较佳方案,因而深受国内外读者的欢迎。

手册主要作者之一的哈特尼特教授于 1985 年秋应邀再次访华时,在北京一下飞机就把这套手册原版赠送给我,并且说这是刚刚出版的。我高兴地接过书后打趣地说:“刚出笼的,怪不得还烫手呢!”当时想,如果这套很有用的工具书能尽快译成中文出版,一定会有很长一段时间里受到读者的欢迎和重视。

科学出版社很快作出了出版新版中译本的决定。在译者、校者和责任编辑的共同努力下,这套手册即将和广大读者见面,这是广大科技界的一件好事。

葛绍岩

于中国科学院工程热物理研究所

序

引言

传热,实际上在每一个工业和环境过程中以及在充满活力的能量生产与转换领域,都起着重要的作用。在电能的生产中,无论是用核裂变、矿物燃料的燃烧、磁流体动力学方法,还是使用地热源,都有为数众多的传热问题需要解决。这些问题涉及到传导、对流和辐射过程,并同诸如锅炉、冷凝器和涡轮机这样一些设备部件的设计有关。工程师们经常面临着需要极大地增强或者降低热流密度,以保持材料在极限温度状态下的完好性的问题。

在《传热学手册》第二版的编写中,编者的目标在于为工程师们提供在处理其日常工作中遇到的传热问题时所需要的资料。编者的主要任务是编出这样一本手册,它包含的资料对与传热技术有关的生产工程师、顾问、研究工程师、大学教授、学生以及技术人员来说是必不可少的。从《传热学手册》第一版发行以来,在基本原理和应用两个方面都有了很大的发展。因此,为了实现我们的目标,必须将《传热学手册》第一版扩充为单独的两本手册:《传热学基础手册》与《传热学应用手册》。

内容

《传热学应用手册》以其原第一版中的几章和完全新加的九章,提供了这一领域实用方面广泛的内容。尤其是“传质冷却”这一章提供了有关薄膜冷却方面的更为详细的资料,而“传热强化技术”这一章已全部改写,以反映新的进展。“换热器”部分已极大地扩充到包括一些基本的设计方法,同时对紧凑式换热器和工业换热器也都给予了特别的注意。

在新增加的篇幅中,有七章涉及能源关键领域内最近的发展,其中包括“流化床和填充床传热”,“太阳能”,“地热传热”,“冷却塔和冷却水池”,“热能贮存”,“热管”以及“建筑传热”。

第二版增加了关于“温度和传热的测量”这一重要的一章。涉及“非牛顿流体”的一章使本书的内容臻于完整,这是在化学工业、医药工业以及食品工业中其影响正在增长的课题。

我们设想,《传热学应用手册》的使用者已经掌握了在本手册的姐妹篇——《传热学基础手册》中所提供的基础知识。总的看来,这两本手册提供了关于传热科学与技术现有水平的最全面的介绍。

单 位*

众所周知,目前国际单位制(SI)还不能完全代替英国工程单位制。由英制到 SI 制的转变将按合理的步调进行,以适应学术、工业和出版界的需要。过渡时期将是较长和复杂的,单位的双重性至少在 10 年或 20 年内可能仍然需要。本版力求同时体现 SI 制和英制,以使这本手册在全世界通用。本手册中的每一个数值结果、表格、图线和方程都按两种单位制给出,而无论在何处都不用无量纲形式表示。在为数不多的几种情况下,为了节省篇幅,某些表格只用一种单位制表示。为了方便读者,换算系数都印在该表格的末尾。

术 语 符 号

编者已作出努力,力求在全手册中使用统一的术语符号。为此,确定了技术术语涉及的范围,但也会见到某些例外。然而,在任何章节内,一个符号都只有一种含义。每一个符号都在本手册各章的末尾定义。在符号表中,每个符号都又按 SI 制和英制单位给出。

索 引

这一版增添的一个特色是编排了一个内容广泛的按字母顺序排列的索引,以便于读者快速查阅资料。总的看来,现在这一版可以根据目录表迅速而又容易地找到本书中的任何一个专题。

致 谢

编者非常感谢第二版作者们为使其专业知识更加适用而作出的努力。他们在其手稿的内容和篇幅方面的合作,他们在结合其高质量的著作具体体现所有上述规格要求的过程中的合作,终于使本手册得以问世。我们相信,这一手册将能够满足未来许多年内工程界的需要。我们也对 McGraw-Hill 图书公司参与本手册的出版的全体工作人员表示谢意,感谢他们在这选题计划付诸实现的各个阶段所作出的努力,感谢他们的通力合作和一贯支持。Richard K., Mickey 和 Peggy Lamb 为本手册作了极好的编辑工作,谨在此表示衷心感谢。最后,还要感谢芝加哥伊利诺伊大学能源中心为此而配备的工作人员,特别是要感谢 E.Y. Kwack 博士和 J. Wiet,他们在整个编辑过程中担任了校对,并提供了组织方面的帮助。

结 束 语

编者对本手册负有最终的责任,已进行了过细的工作以使错误减小到最低限度。但

* 根据我国法定计量单位的有关法令和文件,中译本删去英制单位而只保留国际单位制单位。——校者注

是,这样一部宏篇巨著不可能是一本毫无错误的出版物,因此,编者十分欢迎随时指出任何错误,以便在今后印刷时予以消除。编者也将感激来自读者的可能有助于改进本手册实用性的建议,以便将来再版时予以采纳。

W. M. 罗森诺

J. P. 哈特尼特

E. N. 加尼

主 编 简 介

W. M. 罗森诺,工学博士,麻省理工学院(MIT)机械工程教授和传热实验室主任。罗森诺博士曾以其在传热学领域内的杰出工作而获得 Max Jacob 纪念奖,并被选入美国国家工程科学院。

J. P. 哈特尼特,哲学博士,芝加哥伊利诺伊大学机械工程教授与能源中心主任。哈特尼特博士曾以其在传热学领域内的贡献而获得美国机械工程师学会(ASME)纪念奖和国际传热传质中心的 Luikov 奖章。

E. N. 加尼,科学博士,南斯拉夫萨拉热窝大学机械工程教授。从 1977 年至 1982 年,他曾任美国阿贡国家实验室顾问。1982 年以前,他是芝加哥伊利诺伊大学的副教授。

是,这样一部宏篇巨著不可能是一本毫无错误的出版物,因此,编者十分欢迎随时指出任何错误,以便在今后印刷时予以消除。编者也将感激来自读者的可能有助于改进本手册实用性的建议,以便将来再版时予以采纳。

W. M. 罗森诺

J. P. 哈特尼特

E. N. 加尼

主 编 简 介

W. M. 罗森诺,工学博士,麻省理工学院(MIT)机械工程教授和传热实验室主任。罗森诺博士曾以其在传热学领域内的杰出工作而获得 Max Jacob 纪念奖,并被选入美国国家工程科学院。

J. P. 哈特尼特,哲学博士,芝加哥伊利诺伊大学机械工程教授与能源中心主任。哈特尼特博士曾以其在传热学领域内的贡献而获得美国机械工程师学会(ASME)纪念奖和国际传热传质中心的 Luikov 奖章。

E. N. 加尼,科学博士,南斯拉夫萨拉热窝大学机械工程教授。从 1977 年至 1982 年,他曾任美国阿贡国家实验室顾问。1982 年以前,他是芝加哥伊利诺伊大学的副教授。

目 录

第一章 传质冷却.....	1
第二章 非牛顿流体.....	91
第三章 传热强化技术.....	129
第四章 换热器.....	183
第一部分 换热器热工设计的基本方法.....	183
第二部分 工业换热器.....	247
第三部分 紧凑式换热器.....	326
第五章 热管.....	436

• • •

目 录

第六章 流化床和填充床传热.....	447
第七章 太阳能.....	484
第八章 热能贮存.....	513
第九章 建筑传热.....	544
第十章 冷却塔和冷却水池.....	587
第十一章 地热传热.....	627
第十二章 温度和传热的测量.....	668
参考文献.....	724
索引.....	783

第一章 传质冷却

J. P. Hartnett

(刘登瀛 译)

A. 引言.....	1	4. 液膜冷却与烧蚀的应用.....	42
B. 发散冷却.....	2	C. 气膜冷却.....	43
1. 受迫对流层流流动.....	2	1. 概述.....	43
a. 常物性平板.....	2	2. 受迫对流紊流流动——二维气膜冷却.....	44
b. 包括有异种气体喷入空气边界层的变物性平板.....	4	a. 亚声速平板气膜冷却——解析预测.....	44
c. 自由流为非空气气体的变物性平板.....	6	b. 通过一多孔缝隙喷吹的平板——多股冷却剂喷入低速空气边界层.....	44
d. 平板——非相似性解.....	9	c. 通过开口缝隙切向喷吹的平板——空气喷入低速空气紊流边界层.....	58
e. 常物性二维滞止流动.....	10	d. 喷吹角对亚声速缝隙气膜冷却的影响.....	59
f. 包括扩散热影响的变物性二维滞止流动.....	11	e. 曲率对开缝气膜冷却的影响.....	60
g. 轴对称滞止流动.....	14	f. 物性显著变化对亚声速流动中的开式缝隙气膜冷却的影响.....	60
h. 楔形流动, $u_{\infty} = cx^n$, $T_{\infty} = \text{常数}$	18	g. 其它考虑——亚声速主流条件下的开式缝隙气膜冷却.....	61
i. 广义流动: 具有传质的二维与轴对称三维流动.....	18	h. 传热——亚声速主流条件下的开式缝隙气膜冷却.....	61
j. 掠过锥体的超声速层流流动.....	27	i. 通过多孔缝隙喷吹的气膜冷却——超声速主流.....	62
k. 掠过圆柱体的层流流动.....	27	j. 通过开式缝隙喷吹的气膜冷却——超声速主流.....	63
l. 沿圆柱体的纵向流动.....	30	3. 受迫对流紊流流动——三维气膜冷却.....	66
m. 旋转锥体.....	30	a. 通过单孔喷吹的气膜冷却.....	66
2. 自然对流层流流动.....	30	b. 通过单排孔喷吹的气膜冷却.....	73
a. 水平圆柱体.....	30	c. 通过双排孔喷吹的气膜冷却.....	78
3. 受迫对流紊流流动.....	32	d. 其它考虑——三维气膜冷却.....	82
a. 常物性平板, 空气对空气.....	32	4. 叠加原理对预测气膜冷却有效温比的应用.....	83
b. 可变吹风平板, 空气对空气.....	37	符号表.....	87
c. 平板上的高速紊流边界层, 空气对空气.....	37		
d. 以氢喷入空气的平板.....	39		
e. 二元传质系统——平板.....	40		
f. 具有压力梯度的紊流边界层内的传质, 空气对空气.....	41		

A. 引言

术语“传质冷却”包含发散冷却、液膜冷却、气膜冷却以及各种各样的烧蚀方案。图 1 给出了各种传质冷却形式的图解说明。除气膜冷却外, 所有系统都是物理相似的。由图 1(b) 到 (d) 所示方式的主要差别在于, 图 1(b) 和 (c) 系统的传质分布可以单独控制, 而图 1(d) 系统的传质率则要由系统的热力学性能来决定。

按照这些考虑, 本章 B 节将论述发散冷却, 然后将概述把这些结果用于液膜冷却与烧蚀的情况。在整个 B 节, 还将讨论抽吸的影响。在本章结尾, C 节将论述气膜冷却。

B. 发散冷却

1. 受迫对流层流流动

a. 常物性平板

当常物性气体层流流过其边界层具有质量注入的多孔平板时 [图 1 (b)], 则描述其物理状态的微分方程组为:

连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

能量方程

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

组元方程

$$\rho u \frac{\partial Y}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y}{\partial y} = \rho D_{12} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} \quad (4)$$

严格说来,在常物性流动中并不需要组元方程。然而,可以假定,被喷入的气体尽管具有同自由流气体相同的输运和热力学性质,但却带有特殊的标志(例如,它可能是自由流气体的同位素或者可能是用放射性示踪物标记的示踪气体)。此时所得出的质量分数分布和壁面上的质量分数值,对于自由流和二次气体的物理性质并无显著不同(例如,用氮喷入空气)的实际双组元流动,可能是有价值的。

这一方程组需要七个边界条件。由下列边界条件可以导出一组常微分方程:

当 $y = 0$ 时,

$$\left. \begin{aligned} u &= 0 \\ T &= T_w \\ v &\sim u_\infty / \sqrt{\text{Re}_x} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当 $y \rightarrow \infty$ 时,

$$\left. \begin{aligned} u &= u_\infty \\ T &= T_\infty \\ Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

第二和最后一个边界条件说明,不存在边界层流体进入平板表面的净流动。这样,在表面处的质量分数值 $Y_{y=0}$ 可确定为:

当 $y = 0$ 时,

$$v = - \frac{D_{12}}{1 - Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \quad (7)$$

应当注意,所得出的解仅限于喷吹质量的分布随 $x^{-\frac{1}{2}}$ 而变化的情况。之所以选择这一吹风分布形式,是因为它可以导出一组常微分方程。对于这一物理系统,所得出的速度分布、局部表面摩擦系数以及局部无量纲换热系数示于图 2 至图 4^[1]。

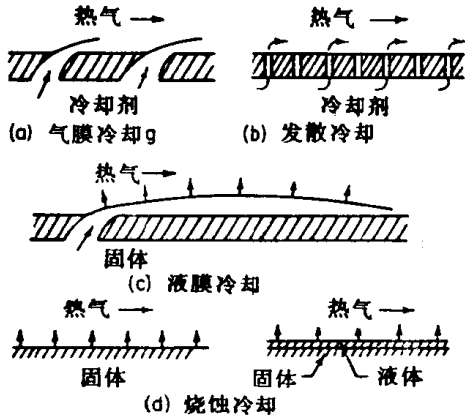


图 1 各种传质冷却简图

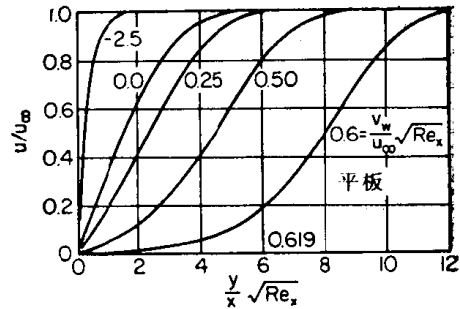


图 2 在各种吹风参数 $(v_w/u_\infty)\sqrt{Re_x}$ 值下,常物性流体层流绕流平板时的无量纲速度分布 u/u_∞ ^[1]

对于向平板上层流边界层的传质,可由图 2 引出下列结论:

(1) 质量加入零压力梯度边界层,将得出 S 形速度分布曲线。鉴于这是一种已知的不稳定速度分布曲线,因而传质是不稳定的(即质量加入平板上的层流边界层流动,可能引起边界层变为紊流)。这一结论不适用于有正压力梯度的流动。

相反,质量由零压力梯度边界层排出(即抽吸)是稳定的。

(2) 无量纲吹风参数 $(\rho_w v_w / \rho_\infty u_\infty) \sqrt{Re_x}$ 的最大值为 0.619。边界层方程不能描述超过这一数值时的流动情况。

局部切应力可由图 3 和下列方程确定:

$$\tau_w = \frac{c_f}{2} \rho u_\infty^2 \quad (8)$$

局部热流密度可按式计算:

$$q_w'' = h(T_w - T_{aw}) \quad (9)$$

局部换热系数由图 4 以吹风率或抽吸率的函数给出。绝热壁面温度 T_{aw} 由下列关系确定:

$$\begin{aligned} T_{aw} &= T_\infty + r \frac{u_\infty^2}{2c_p} \\ &= T_\infty \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} Ma_\infty^2 \right) \end{aligned} \quad (10)^{1)}$$

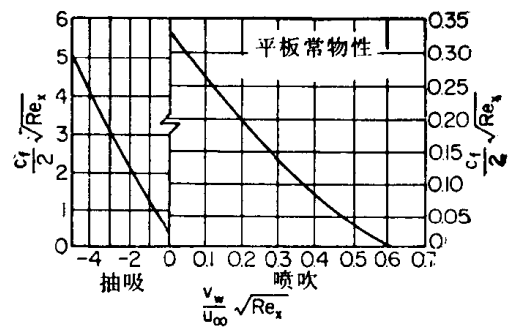


图 3 在各种吹风参数 $(v_w/u_\infty)\sqrt{Re_x}$ 值下,常物性流体层流绕流平板时的局部表面摩擦系数^[1]

在方程(10)中,温度是以 $^{\circ}R$ 或 K 表示的绝对温度。恢复系数 r 由图 5 给出。应当注意,在低速时,恢复温度接近于自由流温度,而在马赫数为零的极限情况下,二者相等。

1) 绝热壁面温度也称作恢复温度。在整个这一章里,这两个术语将交替使用。

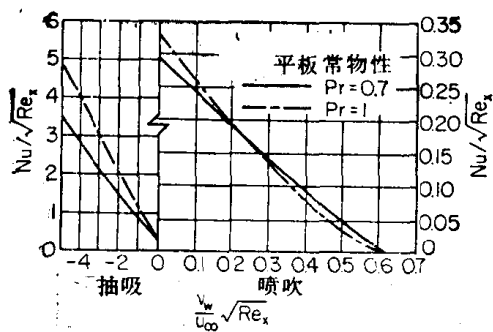


图4 在各种吹风参数 $(v_w/u_\infty)\sqrt{Re_x}$ 值下, 常物性流体层流绕流平板时的局部无量纲换热系数 $Nu/\sqrt{Re_x}$ [11]

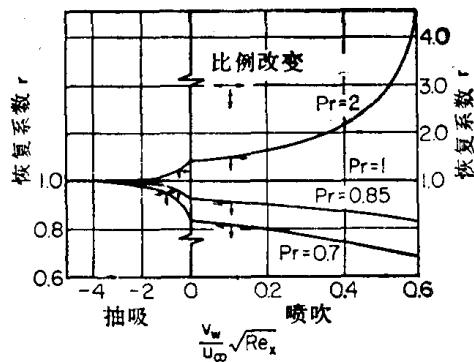


图5 在各种吹风参数 $(v_w/u_\infty)\sqrt{Re_x}$ 值下, 常物性流体层流绕流平板时的恢复系数 [11]

b. 包括有异种气体喷入空气边界层的变物性平板

变物性的影响是通过应用埃克特的参考温度法 [2] 予以计及的。当一致密表面暴露在与传质-冷却板相同的自由流条件下, 并具有与之相同的表面温度时, 可首先确定其换热系数、表面摩擦系数和恢复系数。参考温度 T^* 可先由下式计算:

$$T^* = T_\infty + 0.5(T_w - T_\infty) + 0.22(T_{aw0} - T_\infty) \quad (11)$$

式中

$$T_{aw0} = T_\infty + r_0^* \frac{u_\infty^2}{2c_p^*} \quad (12)$$

$$r_0^* = \sqrt{Pr^*} \quad (13)$$

已知自由流气体的热物性是温度和压力的函数, 并假定壁面温度、自由流速度与温度都是给定的。普朗特数 Pr^* 和比热容 c_p^* 由参考温度确定。由这两个物性的初始估计值可推导出 T_{aw0} 和 T^* 值。而新的 c_p^* , Pr^* 和 T^* 值又可由现在已知的 T^* 确定。该计算反复进行, 直到得到一组一致的 c_p^* , Pr^* 和 T^* 值时为止。而后, 局部表面摩擦系数 c_{f0} 和局部斯坦顿数 St_0 可由下式计算:

$$\frac{c_{f0}}{2} = \frac{0.332}{\sqrt{u_\infty x / \nu^*}} \quad (14)$$

$$St_0 = \frac{c_{f0}}{2} (Pr^*)^{-\frac{1}{3}} \quad (15)$$

参考温度法已证明对于空气、氮、二氧化碳以及氢气是适用的 [3,4]。

在以空气为自由流体并有多种喷吹气体的传质过程中, 其局部表面摩擦系数 c_f 和局部斯坦顿数 St 以正规化形式 c_f/c_{f0} 和 St/St_0 并作为下列无量纲传质率的函数, 表示在图 6 和图 7 中:

$$\frac{\rho_w v_w}{\rho^* u_\infty} \sqrt{\frac{u_\infty x}{\nu^*}}$$

式中, ρ^* 和 ν^* 是按 T^* 取值的自由流气体的密度和运动粘度 [5]。正规化的恢复系数 r/r_0 由图 8 给出 [5]。此时, 局部切应力和局部热流密度即可计算:

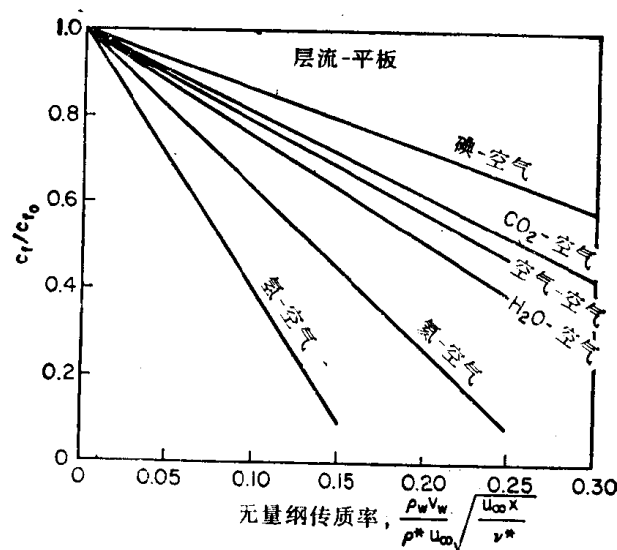


图6 平板上层流边界层内发散冷却时, 正规化表面摩擦系数 c_f/c_{f0} 与异种气体喷入空气边界层时的无量纲传质率的函数关系^[5]

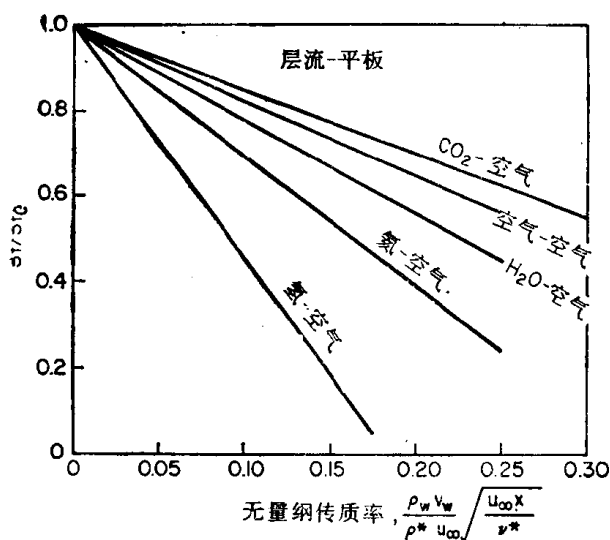


图7 平板上层流边界层内发散冷却时, 正规化斯坦顿数 St/St_0 与异种气体喷入空气边界层时的无量纲传质率的函数关系^[5]

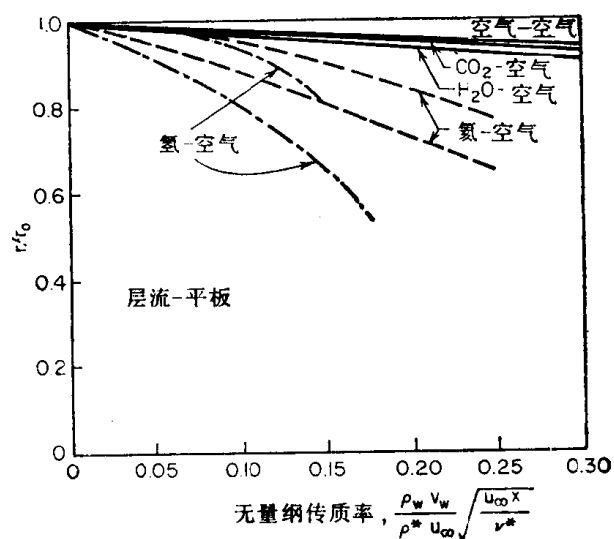


图8 平板上层流边界层内发散冷却时, 正规化恢复系数与无量纲传质率的函数关系^[5]

$$\tau_w = \frac{c_{f0}}{2} \frac{c_f}{c_{f0}} \rho^* u_\infty^2 \quad (16)$$

$$q_w'' = St_0 \frac{St}{St_0} \rho^* c_p^* u_\infty (T_w - T_{aw}) \quad (17)$$

绝热壁温 T_{aw} 可由下式计算:

$$T_{aw} = T_\infty + \frac{r}{r_0} r_0^* \frac{u_\infty^2}{2c_p^*} \quad (18)$$