



当代
杰出青年
科学文库

火焰精细结构 及其传播动力学

孙金华 王青松 纪 杰 等 著



科学出版社

当代杰出青年科学文库

火焰精细结构及其传播动力学

孙金华 王青松 纪 杰 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为详尽地介绍了作者及国内外同行多年来的研究成果,内容主要包括可燃气体预混火焰的精细结构和传播特性,火焰由层流向湍流转变的微观动力过程及其结构的变化规律,可燃液体和粉体云雾火焰的精细结构及其传播机理,气云复合火焰的精细结构、传播特性及其影响因素,固体表面火蔓延的机理及其火焰结构,高原低氧低压和微重力条件下的火蔓延规律及火焰结构特点等。

本书可作为高等学校工程热物理、火灾科学与消防工程、安全工程等专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为燃烧学、火灾安全工程等专业的研究人员和工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

火焰精细结构及其传播动力学/孙金华等著. —北京: 科学出版社, 2011
(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-030598-5

I. ① 火… II. ① 孙… III. ① 火焰结构-研究 ② 火焰传播-研究
IV. ① TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 045780 号

责任编辑: 刘凤娟 唐保军 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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 4 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 4 月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—2 000 字数: 290 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

燃烧是一种急速、剧烈、发热、发光的氧化反应,燃烧的最直观表现形式为火.当火为人类所控制和使用以后,人类社会取得了突飞猛进的发展,当今社会火的使用越来越广泛,在冶金、化工、交通运输、机械制造、纺织、造纸、食品以及国防等轻重工业和人们日常生活中无一脱离得了火的使用.火的使用以及燃烧技术的发展使人们过上了丰富的物质文化生活,有了人类的现代文明.从某种意义上说,没有火,就没有人类社会的进步,也没有今天的高度物质文明,在今后相当长的一段历史时期内仍然如此.

然而万事万物有利必有弊,火若失去控制,让它在具备燃烧条件的地方自由发展,它就会四处蔓延,吞噬那里的各种可燃物质.往往由于一把火,人们辛苦多年创造和积累的财富瞬间化为灰烬,千百年来形成的茂密森林几天内就变成荒野.火还能无情地夺走人的生命,它是自然和社会中的一种主要危害——火灾.火灾是人们所不希望的一种失去控制的由燃烧造成的灾害,它对人类和社会造成的破坏非常巨大.

为更好地控制火,需要对典型燃料的燃烧特性、火焰精细结构及传播动力学进行研究.本书以燃烧基础理论、燃烧测试技术原理及流体力学为基础,分别对气体火焰、云雾火焰、气云复合火焰、固体表面火焰等的精细结构以及传播(蔓延)动力学进行了全面论述,介绍各种形态火焰的特点、火焰传播过程中的精细结构及其动力学规律.全书共分7章,由孙金华教授、王青松博士、纪杰博士等共同撰写,王青松博士和孙金华教授对全书进行了统稿.第1章和第2章主要由王青松博士撰写,第1章主要介绍燃烧的基本概念、燃烧物理和化学基础.第2章主要介绍燃烧实验诊断技术,包括燃烧过程主要物理参量的测定方法和技术.第3章和第4章主要由孙金华教授撰写,第3章重点介绍预混火焰的精细结构和传播机理,包括层流预混火焰和湍流预混火焰的精细结构、层流向湍流转变过程中微观结构的变化等.第4章首先介绍描述云雾火焰两相流体中的基本方程,进而对典型液体云雾火焰和典型固体云雾火焰的精细结构、传播机理进行介绍.第5章主要由陈东梁博士和孙金华教授撰写,重点针对甲烷-煤尘复合火焰结构及其传播进行论述,并讨论影响复合火焰结构和传播特性的因素.第6章主要由陈鹏博士和纪杰博士撰写,重点介绍固体表面火蔓延的机理及其火焰结构,并对多参数耦合作用下固体表面火蔓延进行较为详细的分析.第7章由纪杰博士撰写,介绍特殊环境条件下的火焰结构及蔓延机制,讨论高原低氧低压和微重力条件下的火焰结构特征及火蔓延(传播)机制.

本书是一部系统、全面介绍各种类型火焰精细结构及其传播动力学的专著,重点介绍了作者们多年来在预混气体火焰、云雾火焰、气云复合火焰、固体表面火焰等的精细结构以及传播(蔓延)动力学等方面所取得的最新研究成果.其中高原低压、低氧环境下固体表面火焰结构和传播机理、液体的燃烧特性等属国内外独创性工作.本书的内容充实和完善了燃烧基础理论及火灾动力学理论,为研究燃烧的微观动力学过程提供了理论方法和技术手段.本书不仅可作为从事燃烧学、火灾安全工程等研究人员和工程技术人员的参考书籍,也可作为高等学校工程热物理、安全工程等专业高年级本科生和研究生的教材.

本书在撰写过程中,得到了范维澄院士等多位老师的支持,并引用了中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室部分同事和研究生(如刘义博士、陈先锋博士、何学超博士、李振华博士)的一些研究成果,以及国内外同行的相关研究结论.在此一并向他们表示感谢.本书是作者诸多科研项目研究成果的结晶,如国家自然科学基金面上项目“氧浓度、辐射强度等参数耦合作用下固体表面火蔓延机理研究”(No:50976110)和国家自然科学基金重点项目“高原低压低氧特殊环境下火灾防治的热物理问题”(No:51036007),“十一五”国家科技支撑计划课题“建筑性能化防火设计关键技术及应用示范”(2006BAK06B02),中国科学院优秀“百人计划”后续奖励项目等.在此衷心感谢国家自然科学基金委员会、国家科学技术部、中国科学院等部门在研究经费上给予的大力资助.

虽然作者们在撰写过程中尽了自己最大努力,但由于水平有限加上时间仓促,疏漏在所难免,敬请读者批评指正.

作 者

2010 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 燃烧理论基础	1
1.1 燃烧的基本概念	1
1.1.1 燃烧的概念	1
1.1.2 燃烧三要素和条件	2
1.1.3 可燃物种类	2
1.1.4 燃烧方式与火焰种类	2
1.2 燃烧物理基础	3
1.2.1 混合气体流动的基本参数	4
1.2.2 分子输运基本定律	6
1.2.3 基本守恒方程	9
1.3 燃烧化学动力学和热力学	9
1.3.1 燃烧化学热力学	9
1.3.2 燃烧化学动力学	16
参考文献	29
第 2 章 燃烧测量技术	30
2.1 温度测量	30
2.1.1 热电偶测温	32
2.1.2 辐射测温	36
2.1.3 红外测温	39
2.1.4 其他测温新技术	41
2.2 流场结构测定	45
2.2.1 粒子示踪技术	45
2.2.2 光学测定方法	47
2.3 燃烧反应强度测定	53
2.4 高速摄像在燃烧诊断中的应用	54
2.4.1 影响拍摄结果的基本因素	55
2.4.2 高速摄像系统基本参数设定	56
参考文献	59

第 3 章 可燃预混燃烧、火焰结构及其传播	60
3.1 引言	60
3.2 层流预混燃烧及其火焰结构	61
3.2.1 预混燃烧	61
3.2.2 层流预混火焰及其结构	62
3.3 层流向湍流转变的微观过程及其火焰结构	69
3.3.1 预混火焰的失稳	69
3.3.2 层流火焰向湍流转变的微观过程	72
3.3.3 “Tulip” 火焰的形成原因与机理分析	78
3.4 预混气体燃烧速度和火焰传播速度	84
3.4.1 预混可燃气体的燃烧速度	84
3.4.2 预混可燃气体燃烧速度的影响因素	85
3.4.3 预混可燃气体的火焰传播速度	87
3.4.4 预混可燃气体火焰传播速度的影响因素	87
3.5 可燃预混气的缓燃、爆燃和爆轰	88
3.5.1 爆燃和爆轰的定义	88
3.5.2 爆燃和爆轰的区别	89
参考文献	90
第 4 章 云雾火焰结构及其传播特性	95
4.1 引言	95
4.2 粉尘云燃烧研究中的气相和固相的质量方程	96
4.2.1 描述粉尘云的基本参量	96
4.2.2 气相的质量方程	97
4.2.3 固相的质量方程	98
4.2.4 固相的热传导方程	99
4.3 固体云雾火焰结构及传播机理	100
4.3.1 固体云雾火焰结构实验研究装置	100
4.3.2 易挥发固体云雾火焰及其传播特性	101
4.3.3 含挥发分的固体云雾火焰及其传播特性	105
4.4 金属粉尘云雾火焰结构及其传播特性	105
4.4.1 金属云雾燃烧反应相态的估测	105
4.4.2 典型轻金属粉尘云中火焰的传播特性	106
4.4.3 典型重金属粉尘云中火焰的传播特性	112
参考文献	124

第 5 章 气云复合火焰结构及其传播特性	126
5.1 引言	126
5.2 甲烷-煤尘复合火焰的传播特性	127
5.2.1 实验装置及方法	127
5.2.2 燃料样品及燃料组分构成系数 λ	128
5.3 燃料组分构成对复合火焰特性的影响	129
5.3.1 λ 对火焰传播的影响	129
5.3.2 不同燃料组分构成 λ 对复合火焰温度的影响	132
5.3.3 不同 λ 对复合火焰速度的影响	133
5.4 煤尘粒径对复合火焰特性的影响	134
5.4.1 煤尘粒径对复合火焰形态的影响	134
5.4.2 煤尘粒径对复合火焰温度的影响	137
5.4.3 煤尘粒径对复合火焰传播速度的影响	139
5.5 煤尘种类对复合火焰特性的影响	139
5.6 甲烷-煤尘复合体系的燃烧反应特性	142
5.6.1 甲烷-煤尘复合火焰结构和燃烧反应特性	142
5.6.2 不同条件下复合火焰的燃烧反应特性	143
5.7 甲烷-煤尘复合体系的火焰结构	147
5.7.1 燃料组分构成 (λ) 对复合火焰结构的影响	149
5.7.2 煤尘粒径分布对复合火焰结构的影响	150
5.7.3 甲烷-煤尘复合火焰传播机理	151
5.8 本章小结	152
参考文献	153
第 6 章 固体表面火蔓延及火焰结构	156
6.1 引言	156
6.2 固体可燃物表面火蔓延理论基础	159
6.2.1 固体可燃物火蔓延行为的表征	159
6.2.2 固体可燃物表面火蔓延理论模型	162
6.3 固体可燃物热解特性	166
6.3.1 可炭化材料热解特性	167
6.3.2 热塑性材料	175
6.4 固体表面火蔓延行为	177
6.4.1 固体表面火蔓延行为实验研究装置	177
6.4.2 木材表面火蔓延过程中的温度场及传热分析	178
6.4.3 各种参数对木材表面火蔓延行为的影响	184

参考文献	203
第 7 章 特殊环境条件下的火焰结构与蔓延	207
7.1 引言	207
7.2 低压低氧下的火焰结构及火蔓延	207
7.2.1 固体可燃物火蔓延	207
7.2.2 液体可燃物燃烧特性	212
7.3 微重力条件下火焰结构特征及传播	214
7.3.1 微重力燃烧研究的特点和意义	215
7.3.2 微重力燃烧研究的实验手段	215
7.3.3 微重力燃烧研究概况	216
参考文献	223

第 1 章 燃烧理论基础

火被人类掌握使用以后, 为人类的进步与发展作出了不可估量的贡献. 人类早在一百多万年前就已经利用火来取暖御寒、防御野兽、熏烤野食; 利用火打制武器与工具、制作器皿, 提高劳动生产率. 因此, 火给人类带来了进步. 人类之所以能区别于其他动物也可以说就在于人类会使用火, 恩格斯对此曾作过科学论断: “火的利用使人类第一次支配了一种自然力, 从而最终把人和动物分开.” 故可以认为火的使用是出现人类文明的标志之一.

人类自学会使用火后, 生产力不断提高, 社会也随之进步与发展. 18 世纪蒸汽机的发明导致了产业革命的发生, 而蒸汽机的发明则是人类在使用火 (燃烧燃料) 方面所积累的大量知识与经验的结果. 随着社会生产的发展, 火的使用也越来越广泛, 使用量 (即所谓的能源消耗量) 也越来越大. 在冶金、化工、交通运输、机械制造、纺织、造纸、食品以及国防等轻重工业和人们日常生活中无一脱离得了火的使用. 近年来, 宇航技术的迅速发展, 使人们达到了先人梦幻的境界. 试想若没有很好解决高能燃料 (如液氢等) 的燃烧问题, 怎能制造出巨大功率的火箭发动机把航天器送入太空. 因此, 人类的物质文明与燃烧技术是密切相关的. 从某种意义上说, 没有火, 就没有人类社会的进步, 亦没有今天的高度物质文明, 即使在今后相当长的一段历史时期内亦仍然如此. 燃烧学是一门最古老的学科, 同时也是一门仍将伴随人类发展的新兴学科, 随着社会需求的发展, 需要不断地探索物质燃烧的奥秘^[1].

1.1 燃烧的基本概念

1.1.1 燃烧的概念

燃烧是一种急速、剧烈、发热、发光的氧化反应, 在极短的时间内, 整个燃烧过程要完成燃料与氧化剂的混合以形成良好的可燃混合物、急速的燃烧化学反应、释放能量、传播火焰、燃烧产物的转移等物理及化学的复杂过程. 燃烧反应进行得非常迅速, 并伴随有发光发热的现象, 因此, 概括地说, 燃烧就是可燃物质与氧发生的一种发光发热的高速化学反应. 物质燃烧时, 必须有发光发热现象. 例如, 木材燃烧中伴随着发光发热现象, 并产生新物质, 是燃烧过程; 而生石灰遇水发生化学反应变成熟石灰, 同时有热量产生, 但是没有发光现象, 所以不能叫燃烧.

大多数的燃烧过程都是在气相中进行的, 只有固体燃料的燃烧才有气体与固体

的直接反应存在。固体和液体燃料主要有碳、氢、硫等可燃成分，气体燃料有氢、甲烷、硫化氢、一氧化碳和烃类等。

1.1.2 燃烧三要素和条件

1. 燃烧三要素

燃烧的发生必须同时具备三个要素，即可燃物、氧化剂（助燃物）和着火源，缺少任何一个要素都不能燃烧，而且三个要素必须相互结合、相互作用，否则也不会产生燃烧。燃烧三要素并称为火三角。

可燃物 —— 凡是能与空气中的氧气或其他氧化剂起剧烈反应的物质就称为可燃物。

氧化剂 —— 凡是能够与可燃物质发生燃烧反应的物质称为氧化剂（助燃物），例如氧气等。

着火源 —— 凡是能引起可燃物质燃烧的热源，都称为着火源，例如，火柴和打火机的火焰、烟蒂火、油灯火、蜡烛火、炉火、电线短路打火等，以及化学能、聚焦的日光等。

2. 燃烧的必要条件

任何物质发生燃烧都必须具备以下三个条件：可燃物、氧化剂（助燃物）和着火源，三者缺一不可，三者的关系可用燃烧三角形来表示。

3. 燃烧的充分条件

具备了燃烧的必要条件，并不意味着燃烧必然会发生，燃烧还必须具备以下三个充分条件：一定的可燃物浓度、一定的氧含量、一定的点火热量。以上即为燃烧的充分必要条件，灭火剂的灭火机理即为去掉其中的一个或几个条件，使燃烧中断。

1.1.3 可燃物种类

可燃物是多种多样的，按其形态可分为气态、液态和固态可燃物三种，按其来源可分为天然可燃物和人造可燃物两类。

多年来人们研究可燃物的燃烧特性主要是围绕工程燃烧的需要展开的。在工程燃烧中使用的可燃物一般称为燃料。进行工程燃烧的基本目的是通过燃烧获得热能并加以利用。因此，燃烧所用的燃料必须来源广、价格低，这便决定了燃料基本上是天然物质及其加工产品。主要的固体燃料有煤、煤的干馏残余物、部分木材、木炭等；液体燃料有石油及其炼制产品、若干醇类及部分植物油等；而气体燃料有天然气、液化石油气、人造煤气、人工沼气等。

1.1.4 燃烧方式与火焰种类

燃烧按是否有火焰而分为有焰燃烧和无焰燃烧两种燃烧方式。

有焰燃烧,即燃烧时可产生火焰,是燃烧的基本形式。有焰燃烧的代表性燃料有木材、煤炭、天然气、柴油等。其燃烧反应形式主要为链式反应。

无焰燃烧,在燃烧时不能产生火焰。无焰燃烧的代表性燃料有木炭、部分金属等。其燃烧特点是:蔓延速度缓慢,持续时间长。

燃烧过程中,燃料和氧化剂(典型的为空气)混合燃烧。燃烧可以根据燃料和氧化剂是否预先混合来分类:如果燃料和氧化剂先混合后燃烧称为预混燃烧;如果燃烧和混合是同时发生的,则称为非预混燃烧或扩散燃烧。以上每一种燃烧类型还可根据流体流动是层流还是湍流来进一步分类。表 1.1 给出了每一种燃烧类型的一些例子^[2]。

表 1.1 火焰基本类型及其应用实例^[2]

燃料/氧化剂混合	流体运动	应用实例
预混	湍流	火花点火汽油机、低 NO 固定燃气轮机
	层流	平面火焰, 本生灯火焰
非预混	湍流	煤粉燃烧, 飞机燃气轮机, 柴油机, 氢氧火箭发动机
	层流	蜡烛

在预混火焰中,燃料和氧化剂在有明显的化学反应发生之前达到在分子水平上的混合。煤气炉的燃烧是典型的预混火焰例子。相对地,在扩散火焰中,反应物开始时是分开的,反应只发生在燃料与氧化剂的交界面上。在这一交界面上混合与反应同时发生。蜡烛燃烧就是典型的扩散火焰例子。在实际的设备中,两种不同的火焰形式都会有不同程度的体现。柴油发动机燃烧一般来说既有预混燃烧又有扩散燃烧,而且同等重要。“扩散”严格地用于化学组分之间的分子扩散,即燃料分子从一个方向向火焰扩散,同时氧化剂分子从另一个方向向火焰扩散。在湍流非预混火焰中,湍流将燃料和空气在更宏观的层次上进行对流混合,然后在更小的尺度上进行分子混合,即分子扩散,完成混合过程且发生化学反应。

1.2 燃烧物理基础

燃烧并不是单一的化学过程,也不是单一的物理过程,它是物理、化学现象的综合过程。燃烧化学反应的发生必须具备一定的条件,如燃烧时物质的浓度及其温度,这便与气体运动、分子扩散、热量传递等物理因素有关。在实际的燃烧过程中,不管是气体燃料、液体燃料还是固体燃料,它们的燃烧化学反应总是全部或部分地在气相中进行的。而且在化学反应的同时,总是伴随着火焰的传播和流动,燃料、氧化剂及燃烧产物等组分的扩散、流动、热量的传递等。因此研究燃烧问题时,不仅需要考虑化学动力学问题,更应研究燃烧中的物理现象,即气体(或气态)分子的层

流与湍流的基本规律及数理模型, 燃烧过程中的传热与传质. 因此如果从技术科学的角度来看燃烧科学的话, 可以认为它是伴有化学反应的流体动力学^[3]. 本节就燃烧过程的物理现象和基本规律进行论述.

1.2.1 混合气体流动的基本参数

1. 多组分气体的基本参数

物质的密度是进行流动计算的基本参数. 若某微元体 ΔV 内含有多种组分混合气体, 其质量为 $\Delta m(t)$, 那么该点的质量密度 ρ 为

$$\rho(t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m(t)}{\Delta V} \quad (1.1)$$

如果在该混合气体中共有 n 种组分, 每一种组分用 i 来表示, 那么 P 点处 i 组分的质量密度为

$$\rho_i(t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m_i(t)}{\Delta V} \quad (1.2)$$

而 i 组分的相对质量浓度 (省略掉 t) 可写为

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (1.3)$$

质量密度与摩尔数之间的关系为

$$\rho = cM \quad (1.4)$$

$$\rho_i = c_i M_i \quad (1.5)$$

式中, c 、 c_i 分别是单位体积中总摩尔数 (即摩尔浓度) 和 i 组分的摩尔数 (摩尔浓度); M 和 M_i 分别是混合气体的平均分子量和 i 组分的分子量.

显然, 在混合气体中, 总摩尔数等于各种组分摩尔数之和, 即

$$c = \sum_i c_i \quad (1.6)$$

根据上述各式, 可以得出多组分气体混合物的平均分子量为

$$M = \frac{\rho}{c} = \frac{\sum_i \rho_i}{\sum_i c_i} = \frac{\sum_i c_i M_i}{\sum_i c_i} \quad (1.7)$$

于是

$$Y_i = \frac{c_i}{c} = \chi_i \frac{M_i}{M} \quad (1.8)$$

式中 χ_i 称为 i 组分的相对摩尔浓度.

在燃烧问题中,一般认为多组分气体服从理想气体定律. 这样由理想气体状态方程可以得到

$$p_i = \rho_i \frac{R}{M_i} T = c_i RT \quad (1.9)$$

$$p = \rho \frac{R}{M} T = cRT \quad (1.10)$$

而

$$\chi_i = \frac{c_i}{c} = \frac{p_i}{p} \quad (1.11)$$

2. 混合气的流动^[3]

1) 流速与通量

在多组分的混合物流动中各组分分子通常有不同的运动速度, 当然, 我们在这里不是讨论单个分子的运动, 而是对每一个组分分子及混合物分子群体而论 (即只具有统计意义). 故混合物中某组分的流速 v_k 就是该组分分子的平均速度. 混合物的流动质量平均速度 v 是各组分分子平均速度 v_k 的质量加权平均值, 即混合气的质量平均速度 v 定义为: 当混合气全部分子以速度 v 运动时所具有的动量与混合气流的实际动量相等, 故

$$v = \frac{\sum_{k=1}^j \rho_k v_k}{\rho} \quad (1.12)$$

混合物流动平均通量 (或简称为混合物的流动通量) 为

$$G_T = \rho v = \sum_{k=1}^j \rho_k v_k = \sum_{k=1}^j G_k \quad (1.13)$$

从上述关系可知, 混合物流动通量 G_T 是各组分平均质量通量 G_k 之和.

2) 混合流中的组分扩散

组分 k 流速 v_k 与混合气的质量平均流速 v 之差使组分 k 相对混合气流以扩散速度 $v_{d.k}$ 运动, 即

$$v_{d.k} = v_k - v \quad (1.14)$$

其质量扩散通量 $G_{d.k}$ 为

$$G_{d.k} = \rho_k \cdot v_{d.k} \quad (1.15)$$

在稳定的混合物流中, 各组分扩散通量之和为零, 即

$$\sum_{k=1}^j G_{d.k} = 0 \quad (1.16)$$

3) 混合流中组分 k 的对流通量 $G_{c.k}$

组分 k 的对流通量是混合流平均速度携带组分 k 流动的通量

$$G_{c,k} = \rho_k v = Y_k \rho v = Y_k G_T \quad (1.17)$$

各组分流体通量之和为

$$\sum_{k=1}^j G_{c,k} = \sum_{k=1}^j Y_k C_T = G_T \quad (1.18)$$

即混合流中各组分流体通量之和为混合流的通量。

从组分扩散速度 $v_{d,k}$ 知

$$\rho_k v_{d,k} = \rho_k v_k - \rho_k v$$

即

$$G_{d,k} = G_k - G_{c,k} \quad (1.19)$$

即组分 k 的平均质量通量为该组分在混合流中的扩散通量与对流量之和。于是

$$\sum_{k=1}^j G_k = \sum_{k=1}^j G_{d,k} + \sum_{k=1}^k G_{c,k} \quad (1.20)$$

因为 $\sum_{k=1}^j G_{d,k} = 0$, 所以

$$\sum_{k=1}^j G_k = \sum_{k=1}^j G_{c,k} = G_T \quad (1.21)$$

可以看出, 尽管各组分的扩散通量不等于其对流通量, 但组分平均质量通量之和与对流通量之和相等, 并等于混合流总通量。

1.2.2 分子输运基本定律

分子输运定理指的是在不考虑交叉输运现象时, 由速度梯度引起的动量交换、由温度梯度引起的热量交换以及由浓度梯度引起的质量交换所遵循的定律, 它们分别是牛顿黏性定律、傅里叶导热定律和费克组分扩散定律。

1. 牛顿黏性定律

设两块间距为 σ 的无限宽和无限长的不可渗透平板间充满等温的流体。如果下平板固定不动, 上平板以速度 u_∞ 运动, 可发现, 流体的速度将由上平板处的 u_∞ 变到下平板处的零。这表明流速快的一层和流速慢的一层之间有剪切力。单位面积上剪切力的大小和速度梯度 $\partial u / \partial y$ 成正比, 即

$$\tau = -\mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.22)$$

式中, τ 是单位面积上的剪切力; μ 是动力黏性系数; $\partial u / \partial y$ 是速度梯度; 负号表示动量传递与速度 u 增加的方向相反。

2. 傅里叶导热定律

设在间距为 σ 的两个平行平板之间充满一种静止流体, 上板温度为 T_∞ , 下板温度为 T_w , 且 $T_\infty > T_w$. 这样在 y 方向的各层之间存在温差, 各层之间发生热量交换, 热量将从温度高的一层传向温度低的一层. 单位时间内, 单位面积上的热流量是与温度梯度成正比的, 即

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.23)$$

式中, q 是单位时间单位面积上的热流量; λ 是导热系数; $\partial T/\partial y$ 是温度梯度; 负号表示热流方向与温度升高的方向相反.

3. 费克组分扩散定律

设在相距 σ 的两个多孔的平行平板之间充满一种静止的等温流体 B. 另一种与 B 温度相同的流体 A 从一块板的外侧渗入 (渗入浓度为 $c_{A\infty}$), 而从另一块板渗出 (渗出浓度为 c_{Aw}). 若 $c_{A\infty} > c_{Aw}$, 则在 B 中不同的层上, A 的浓度不同. 由于 A 的浓度差存在而发生扩散. 单位时间、单位面积上流体 A 扩散造成的物质流与在 B 中流体 A 的浓度梯度成正比, 即

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \quad (1.24)$$

式中, J_A 表示单位时间内、单位面积上流体 A 扩散造成的物质流量; D_{AB} 是 A 在 B 中的扩散系数. $\partial \rho_A/\partial y$ 是流体 A 的浓度梯度, 负号表示物质扩散的方向与其浓度增加的方向相反.

在考虑两种组分以上的多组分混合物的扩散问题时, 常常把最关心的第 i 种组分考虑为一种组分, 而把其他所有的组分作为另一种组分 j , 这样近似地按双组分扩散问题处理, 因此扩散方程可写为

$$J_i = -D_{ij} \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \quad (1.25)$$

这时, 扩散系数 D_{ij} 和各组分的成分及其浓度有关.

4. 多组分气体的交叉输运现象

燃烧过程中涉及的都是多组分气体. 多组分气体的输运现象与单组分气体的输运现象不同, 各种输运现象之间有相互影响.

1) 传热

假定多组分气体处于流动状态. 则其总体在空间静止坐标系中有一个宏观流动速度 v_e , 而其中的 i 组分相对于混合气体整体有一个扩散速度 v_{ti} , 这时 i 组分在空间静止坐标系中的绝对速度 $v_{oi} = v_e + v_{ti}$.

对于多组分气体, 应对描述导热现象的傅里叶定律加以修正. 应在温度梯度所产生的热流基础上, 再加上扩散的物质流所携带的值 $\sum_i \rho_i v_{ti} h_i$, 即

$$q = -K \nabla T + \sum_i \rho_i v_{ti} h_i \quad (1.26)$$

式中 h_i 为 i 组分的焓, 它包括显焓 (物理焓) 和生成焓 (化学焓), 即

$$h_i = h_{oi} + \int_0^T c_{pi} dT \quad (1.27)$$

式中 h_{oi} 是 i 组分的生成焓. c_{pi} 是 i 组分的质量定压热容.

如果各组分的焓 h_i 都相同, 即相当于一种单组分气体. 于是各组分扩散的物质流所携带的热流矢量之和就等于零. 式 (1.26) 恢复为普通的傅里叶定律.

2) 传质

考虑既有浓度梯度造成的物质流, 又有因对流流动造成的物质流.

如图 1.1 所示, 在两块无限大的多孔平板间是混合流体 (A+B), 上、下板处组分 A 的质量相对浓度分别为 $Y_{A\infty}$ 和 Y_{Aw} ($Y_{A\infty} > Y_{Aw}$), 组分 A 由上向下扩散, 同时混合流体的流量 ρv 向下运动, 并且在整个时间内, 平板的浓度场是稳定的, 故通过上板在单位时间单位面积上流向下板的组分 A 的质量为 $\rho v Y_{A\infty}$, 而由下板流出的组分 A 的质量为 $\rho v Y_{Aw}$. 故通过对流传输的组分 A 的质量为 $\rho v (Y_{A\infty} - Y_{Aw})$, 因此传质的总量为

$$W_A = \rho D \frac{Y_{A\infty} - Y_{Aw}}{\delta_D} + \rho v (Y_{A\infty} - Y_{Aw}) \quad (1.28)$$

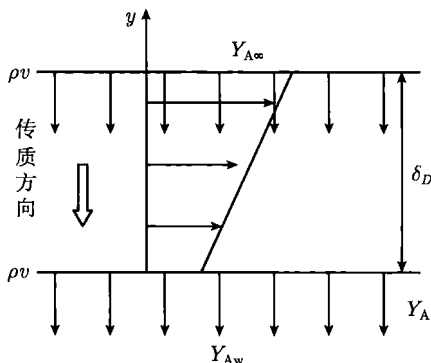


图 1.1 具有对流时的传质

定义传质系数 $h_D = \rho D / \delta_D$ 和传质贝克莱数 $Pe_D = \rho v \delta_D / \rho D = v \delta_D / D$. 得

$$W_A = h_D (Y_{A\infty} - Y_{Aw}) (1 + Pe_D) \quad (1.29)$$

但与传热情况不同的是 $Pe_D \approx 1$ 是不能忽略的.