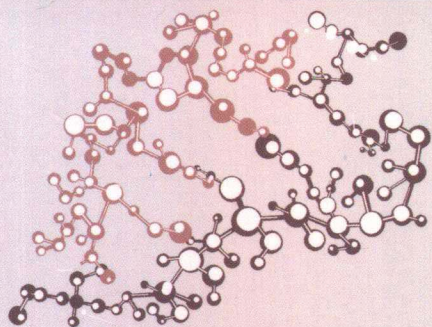




陈 鹏 郭实龙 李艳超 著

受限空间内甲烷-空气 预混火焰传播动力学



科学出版社

受限空间内甲烷-空气预混火焰 传播动力学

陈 鹏 郭实龙 李艳超 著

国家自然科学基金面上项目(51274205)

煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM10KFB13)

建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(2015109010089)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以燃烧学、化学反应动力学及流体力学为基础,从实验方法、理论模型和数值模拟上对受限空间内甲烷-空气预混火焰传播动力学进行系统论述,内容主要包括受限空间内甲烷-空气预混火焰总表面积、管道内压力和压力上升速率之间的理论关系式,甲烷-空气预混火焰的精细结构和传播特性,亚格子涡黏模型和亚格子湍流燃烧模型对非稳态甲烷-空气预混火焰传播预测性能,甲烷预混火焰与湍流的相互作用机制,层流火焰向湍流转换的机理及其结构的变化规律等。

本书可作为高等院校安全工程、消防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人员和工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

受限空间内甲烷-空气预混火焰传播动力学 / 陈鹏, 郭实龙, 李艳超著.
—北京: 科学出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-03-052447-8

I. ①受… II. ①陈…②郭…③李… III. ①火焰传播-动力学-研究
IV. ①TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 068634 号

责任编辑: 杨向萍 张晓娟 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 熙望

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 4 月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 196 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

能源作为人类赖以生存和发展的物质基础之一,与国计民生和国家安全息息相关。受环境污染影响,天然气等清洁能源在我国能源消费总量中的比例呈逐年递增的趋势。可燃易爆气体在其生产、输运、存储和利用过程中一旦泄漏,通常容易引发火灾和爆炸事故,造成生命和财产损失。因此,从安全角度出发,对受限空间内可燃性气体预混燃烧早期发展阶段开展基础性研究,加强可燃气体爆炸事故后果预测与反演技术开发,充分认识可燃气体在受限空间内爆燃的基本现象,建立以爆炸反应动力学为基础的安全基础数据,对从本质上防控受限空间内可燃气体爆燃有着重大的科研价值和现实意义。

为更好地控制可燃气体火灾,需要对可燃气体的燃烧特性、火焰结构及传播动力学过程进行研究。本书是一部研究受限空间内甲烷-空气预混火焰结构及其传播动力学的专著。以燃烧理论、化学反应动力学及计算流体力学为基础,采用高速摄像系统拍摄预混火焰传播的动态过程,应用高频动态压力采集系统捕捉管道内火焰传播过程中的压力信息。通过理论分析,得到管道内压力与火焰面积之间的关系式。基于三维大涡模拟,对比若干种亚格子燃烧模型对爆燃过程的适用性,并根据数值模拟、理论分析结合实验结果,对甲烷-空气预混气体的火焰结构、燃烧特性(如湍流火焰速度、火焰燃烧机制)、温度场、流场(流线、涡量)、压力场等信息,以及火焰传播动力学进行了定性和定量分析,探究空管道和含障碍物管道内火焰形态的特点,火焰传播过程中的精细结构及其动力学规律。

在撰写本书过程中,得到了中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院多位老师的支持,并引用了中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院部分研究生(如杨永波硕士、纪婧硕士、张玉涛硕士)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(51274205)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLC RSM10KFB13)、建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(2015109010089)等。在此衷心感谢国家自然科学基金委员会、煤炭资源与安全开采国家重点实验室、公安部天津消防研究所等部门在研究经费上给予的大力资助。

作者在撰写过程中虽然尽了最大的努力,但限于水平,加之时间仓促,疏漏在所难免,敬请广大读者批评指正,在此表示衷心的感谢。

作 者
2016 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 安全背景	1
1.2 能源利用背景	3
1.3 研究意义	4
第 2 章 可燃预混气体燃烧研究进展	6
2.1 预混火焰	6
2.1.1 层流预混火焰传播理论	6
2.1.2 火焰不稳定性	10
2.1.3 湍流预混燃烧	12
2.1.4 火焰自湍化理论	17
2.2 受限空间内预混火焰发展机制	17
2.2.1 障碍物对火焰传播的加速机理	18
2.2.2 爆燃向爆轰转捩	19
2.2.3 受限空间内可燃气体抑爆技术	20
2.3 基于亚格子湍流燃烧模型的爆燃模拟	20
2.4 受限空间内可燃气体燃烧的研究评述	21
第 3 章 燃烧实验诊断技术	22
3.1 温度测量	22
3.1.1 接触式测温法	23
3.1.2 非接触式测温法	25
3.2 火焰自发光图像摄影法	27
3.3 流场结构测定	28
3.3.1 粒子图像测速技术	28
3.3.2 衍射成像法	33
3.4 燃烧反应进程测量	35
3.4.1 离子探针测量技术	36
3.4.2 平面激光诱导荧光技术	36
第 4 章 实验系统和实验方法	38
4.1 实验系统	38

4.1.1	燃烧管道	38
4.1.2	配气与洗气系统	40
4.1.3	点火系统	41
4.1.4	高速摄影仪	41
4.1.5	压力测量系统	42
4.1.6	离子电压测试系统	42
4.1.7	数据采集仪	43
4.1.8	同步控制器	44
4.2	实验程序与初始条件	44
4.2.1	实验方法	44
4.2.2	实验程序	44
4.2.3	实验初始条件	45
第5章	可燃预混气体火焰传播的大涡模拟	46
5.1	物理模型	47
5.2	湍流模型	47
5.2.1	RANS	48
5.2.2	LES	48
5.3	亚格子燃烧模型	51
5.4	数值方法、初始条件和边界条件	53
第6章	空管道内甲烷-空气预混火焰传播动力学	54
6.1	甲烷-空气预混火焰传播的实验研究	54
6.2	甲烷-空气预混火焰传播的数值模拟研究	55
6.2.1	火焰形态变化特征	55
6.2.2	火焰速度变化特性和升压特性	56
6.2.3	火焰锋面和流场的相互作用	57
6.2.4	燃烧反应强度和火焰面厚度	58
6.3	长径比对甲烷-空气预混火焰传播特性的影响	59
第7章	置障管道内甲烷-空气预混火焰传播动力学	63
7.1	置障管道内甲烷-空气预混火焰的实验研究	63
7.1.1	火焰形态变化特征	64
7.1.2	火焰前锋动力学特性	66
7.1.3	升压特性	67
7.2	亚格子燃烧模型的预测性能分析	68
7.2.1	火焰形态变化	68
7.2.2	火焰前锋传播速度变化和升压特性	68

7.3 阻塞率对甲烷-空气预混火焰传播特性的影响	70
7.3.1 火焰形态变化特性	70
7.3.2 火焰前锋传播速度变化特性和升压特性	70
7.3.3 流场结构	72
7.3.4 障碍物对火焰传播的影响机制	74
7.3.5 温度场	75
7.3.6 涡量特征	76
7.3.7 湍流和火焰的相互作用机制	77
第8章 孔口障碍物管道内甲烷-空气预混火焰传播动力学过程	80
8.1 火焰表面积理论推导	80
8.2 孔口形障碍物管道内甲烷-空气预混火焰传播特性的实验研究	84
8.3 模拟有效性验证	88
8.3.1 网格独立性分析	88
8.3.2 Pope 准则验证	89
8.4 模型对比分析	90
8.4.1 涡黏模型对比	90
8.4.2 湍流火焰速度	91
8.4.3 静态和动态 power-law	91
8.5 模拟初始条件和边界条件	93
8.6 数值模拟结果	94
8.6.1 不同模型模拟结果对比	94
8.6.2 不同 power-law 模型计算结果对比	99
8.7 球形和指形阶段甲烷-空气预混火焰传播动力学过程	102
8.7.1 火焰结构变化	103
8.7.2 火焰锋面位置和速度	104
8.8 孔口形障碍物对甲烷-空气预混火焰传播的影响	106
8.8.1 火焰面湍流火焰速度	106
8.8.2 管道内温度	107
8.8.3 管道内流场	110
8.8.4 管道内涡量	112
8.8.5 管道内压力分布	114
8.9 火焰燃烧机制	116
第9章 障碍物孔形、孔间距对甲烷-空气预混火焰传播影响	118
9.1 障碍物开孔形状对火焰传播过程的影响	118
9.1.1 火焰形态	118

9.1.2	火焰传播速度	119
9.1.3	压力动态变化	120
9.2	障碍物孔间距对火焰传播的影响	121
9.2.1	火焰形态变化特性	122
9.2.2	火焰前锋传播速度变化规律	123
9.2.3	管道内压力动态变化规律	125
第 10 章	障碍物孔数对甲烷-空气预混火焰传播影响	126
10.1	双孔障碍物对管道内甲烷-空气预混火焰传播影响	126
10.1.1	火焰形态变化过程的自发光图像	126
10.1.2	火焰形态变化过程的数值模拟	128
10.1.3	火焰前锋传播速度变化特性	130
10.1.4	管道内超压特性	131
10.1.5	管道内流场分布的数值模拟	133
10.1.6	管道内速度分布的数值模拟	134
10.2	障碍物孔数对火焰传播特性的影响	134
10.2.1	火焰形态发展变化特性	135
10.2.2	火焰前锋位置与火焰速度	135
10.2.3	管道内压力动态变化特性	137
10.2.4	火焰传播和湍流的相互作用	138
参考文献		139

第 1 章 绪 论

能源作为人类赖以生存和发展的物质基础之一,与国计民生和国家安全息息相关。煤炭作为我国的能源支柱,在国民经济中具有举足轻重的地位。但煤炭在燃烧过程中产生的硫化物、氮氧化物和粉尘颗粒等会造成严重的大气污染,天然气作为一种清洁能源,在我国能源消费总量中的比例呈逐年递增的趋势,如表 1.1 所示。

表 1.1 2000~2014 年中国能源消费总量构成表

年份	能源消费总量 /($\times 10^8$ t 标准煤)	占能源消费结构的比例/%			
		煤炭	石油	天然气	水电、核电、风电
2000	14.5	69.2	22.2	2.2	6.4
2001	15.0	68.3	21.8	2.4	7.5
2002	15.9	68	22.3	2.4	7.3
2003	18.4	69.8	21.2	2.5	6.5
2004	21.3	69.5	21.3	2.5	6.7
2005	23.6	70.8	19.8	2.6	6.8
2006	25.9	71.1	19.3	2.9	6.7
2007	28.1	71.1	18.8	3.3	6.8
2008	29.2	70.3	18.3	3.7	7.7
2009	30.7	70.4	17.9	3.9	7.8
2010	32.5	68	19	4.4	8.6
2011	34.8	68.4	18.6	5	8
2012	36.2	67.5	19	5.3	8.2
2013	37.5	66	18.4	5.8	9.8
2014	42.6	66	17.1	6.2	10.7

注:数据来源于《中国统计年鉴》。

1.1 安全背景

天然气等可燃易爆气体在生产、输运、存储和利用过程中一旦泄漏,通常容易

引发火灾和爆炸事故,造成生命和财产损失^[1]。可燃气体爆炸的发生、发展过程大致如下:可燃气体泄漏后与周围环境空气混合成一定体积分数的可燃预混气体。如果预混气体的浓度在爆炸极限范围内,当它遇到一定能量的点火源后,就会形成一个预混燃烧火焰面。在传热传质作用下,火焰面以一定的速度向四周传播,形成爆燃,表 1.2 是甲烷的燃烧与爆炸特性。通常情况下,爆炸发生地点的周围环境中存在各种障碍物,在障碍物诱发的湍流作用下,火焰表面褶皱变形,预混气体体积燃烧速率增加,火焰锋面加速传播,一定条件下可以形成爆轰^[1]。爆燃是一种亚音速传播的燃烧波,火焰前锋始终位于前驱冲击波后方,而爆轰是一种超音速传播的燃烧波,火焰面与前驱激波耦合向未燃气体传播。爆炸产生的高温和超压会对人体和设施造成不同程度的危害,特别是爆轰,破坏力更大。例如,甲烷的爆轰传播速度为 1.8km/s,超压可达 17.4bar^{①[1]}。

表 1.2 甲烷的燃烧与爆炸特性

爆炸下限/%	爆炸上限/%	传播极限/%	最小点火能/mJ	自燃温度/K	燃烧热/(kJ/g)
5.0	15	9.5	0.29	903	52.8

虽然国内外学者通过理论、实验和数值模拟等手段对可燃气体的爆燃和爆轰已经有了深入的认识,并且提出了相关的预防措施,但可燃气体火灾爆炸事故在工业生产和居民生活中仍然时有发生。

在煤炭井下开采过程中,岩层或煤层中伴生的瓦斯会逸散到矿井巷道空气中,形成瓦斯-空气预混气体,遇到一定的点火将发生爆炸,不仅会造成严重的人员伤亡,还会对矿井生产造成巨大影响,有时甚至引起二次事故。煤矿瓦斯爆炸事故是最为常见的可燃气体爆炸事故。据统计,2001~2012 年,我国共发生较大及以上瓦斯爆炸事故 897 起,死亡 8200 人。其中,157 起重大伤亡事故,造成 2550 人死亡;37 起特别重大事故,造成 2241 人死亡^[2]。

另外,在非煤工业生产和民用领域,可燃气体引发的燃烧爆炸事故也多有发生。2013 年 11 月,山东省青岛经济技术开发区东黄输油管道原油泄漏,进入市政排水暗渠,油气在封闭的暗渠内积聚遇火花发生爆炸,造成 62 死 136 伤的严重后果,直接经济损失 75172 万元。2014 年 11 月,厦门一家小吃店发生煤气爆炸,事故造成 5 人死亡,数十人受伤,附近的商铺和住宅也受到不同程度的损毁。2015 年 2 月 24 日,成都“五洛路 1 号”隧道发生瓦斯爆炸事故,造成 4 人遇难,22 人受伤。此类事故不胜枚举,所带来的生命财产损失更是触目惊心,图 1.1 为受限空间内可燃气体爆炸事故现场。由于可燃气体具有易燃易爆的特性,因此在生产、运输、储存

① 1bar=10⁵Pa。

和使用过程中必须采用合理的防范措施,以避免潜在燃烧爆炸事故的发生,或在事故发生时最大限度地减弱其损失。但爆轰燃烧波的速度可以达到数千米每秒,并产生几十倍的超压,远远超出了围护结构的耐受极限,而且一般的爆炸处理方法很难有效应用在爆轰环境。因此,从安全角度出发,对受限空间内可燃气体预混燃烧早期发展阶段开展基础性研究,加强可燃气体爆炸事故后果预测与反演技术开发,充分认识可燃气体在受限空间内爆燃的基本现象,建立以爆炸反应动力学为基础的安全基础数据和安全防护标准,对从本质上防控受限空间内可燃气体爆燃有着重大的科研价值和现实意义。



(a) 青岛输油管道原油泄漏爆炸



(b) 成都隧道瓦斯爆炸

图 1.1 受限空间内可燃气体爆炸事故现场

1.2 能源利用背景

可燃预混气体的燃烧在工业生产中的应用相当广泛。在航空航天领域,目前有三种利用可燃气体爆震波产生推力的非稳态推进装置:脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)、斜爆震波发动机(oblique detonation wave engine, ODWE)和旋转爆震波发动机(rotating detonation wave engine, RDWE)。这三类发动机的共同特点是具有快速的能量释放速率和高热力循环效率,都得益于爆震波所产生的高压(约 20bar)和流体的高速流动(约 2000m/s)。然而爆震波的诱发需要一定的条件,通常人们希望在较小尺寸的燃烧室内通过火焰加速诱发爆震,其中,在火焰传播路径中布置障碍物是一种有效的手段。在内燃机领域,随着人们环保意识的加强,利用可燃气体作为燃料的热力发动机在内燃机市场上已经占有一定的比例,并且在欧美等国家和地区得到了一定程度的普及。人们希望通过研究内燃机内部的湍流燃烧过程,设计出热效率更高、污染物排放率更低的气体燃料内燃机。除此之外,可燃气体燃烧在工业发电、民生等方面也具有广泛应用。

1.3 研究意义

研究受限空间内预混气体火焰发展的动力学过程,对于灾害控制和能源利用都有重大的现实意义和科学意义。不论是失控的预混燃烧,还是被人们所利用的预混燃烧,就其本质而言,都是一种带有快速化学反应的流体动力学(reactive flow)过程。反应流体力学是化学反应动力学、热力学和流体力学相互结合的一门交叉性学科,具有瞬时性和复杂性。预混气体燃烧具有反应流的特性,并且附加了自身特有的属性,因此它的一些参数很难通过实验诊断得到。如今,通过实验诊断可以得到的燃烧参数主要有火焰面的温度、结构、位置与传播速度,环境压力,反应物和产物的浓度,流体速度矢量及其随时间和空间的分布等^[3]。但实际情况下,燃烧的复杂性与多样性及设备自身的误差,不仅增加了诊断的难度,同时又降低了测量的精确度。另外,一些大尺度的燃烧现象,如爆炸,考虑到它的经济性与安全性,使用燃烧实验诊断手段更是难上加难,因此,人们希望通过计算机数值模拟的方法弥补实验手段的不足。

如图 1.2 所示,近几十年来,随着计算机技术(特别是并行计算技术)的飞速发展,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)在预混燃烧领域的应用越来越广泛。其方法是应用计算流体力学的理论,将燃烧反应流场进行离散,把离散点上场变量之间的关系按照数学方法建立方程组,迭代求解方程组获得变量的近似解,最终实现对流体流动和传热传质等现象的分析。实际计算过程中,节点数是保证计算精确度的一个重要参数。约 50 年前,人们普遍认为一个具有 10^6 个网格的二维计算域已经十分巨大。如今,大型并行计算技术使人们能够在超过 10^9 个三维网格的求解域计算非稳态燃烧现象。国内外一些学者已经利用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)的结果指导和验证燃烧理论工作。

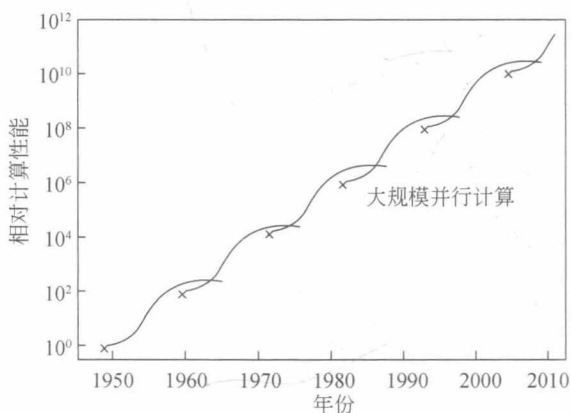


图 1.2 计算机性能随时间变化的趋势^[4]

目前,在燃烧计算过程中,对湍流的处理方法主要有三种:雷诺时均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)模型、大涡模拟(large eddy simulation, LES)和 DNS。RANS 模型在湍流预测的精度上存在瑕疵。DNS 在计算精度上的优势十分明显,但计算量巨大,并且对计算机内存空间和计算速度要求极高^[5],目前,普通计算机无法承受,因此暂时还没有得到普遍应用。LES 是介于 RANS 和 DNS 之间的一种湍流处理方法,在湍流燃烧模拟方面极具前景^[6]。相比 RANS 和 DNS, LES 具有两个重要的优势:一是对网格节点数的要求远低于 DNS,近些年,并行计算机性能的飞速发展,使利用 LES 预测强湍流和较复杂几何结构内的流体运动成为可能;二是 LES 可以得到比 RANS 更多的流场信息,这对研究障碍物条件下的湍流预混火焰具有十分重要的意义。然而,在利用 LES 计算预混燃烧时会遇到一个难题,即火焰厚度为 $0.1 \sim 1\text{mm}$,在计算网格尺寸下是一种亚格子(sub-grid scale)现象而不能被直接求解。目前,这一难题有三种解决方案,即利用增厚火焰模型、火焰面模型和火焰表面密度模型来模拟或追踪火焰面。这些方法中,亚格子湍流燃烧模型需要考虑小尺寸的涡旋结构对局部燃烧速率的影响,LES 计算湍流燃烧时,反应速率作为组分输运方程的源项,不能直接求解,可以被数种亚格子燃烧模型封闭并解算^[7]。

利用 LES 计算预混可燃气体燃烧时,亚格子湍流燃烧模型的选择是至关重要的^[8]。首先,要确认这些燃烧模型能否定量地耦合亚格子湍流强度和化学反应速率;其次,这些模型能否捕捉到不同燃烧机制的转捩;最后,这些模型最好能够尽可能少地利用参数和经验常量提供定量的预测。

迄今为止,国内外学者已经提出了多种可用于 LES 的亚格子湍流燃烧模型^[8]。这些模型已被证实有能力预测完全发展的湍流燃烧中火焰-湍流的相互作用,但是这些模型是否适合瞬态的燃烧过程(如爆炸)还不得而知。另外,这些模型能否有效地预测含有燃烧机制转捩的场景还需进一步验证。对比不同亚格子燃烧模型对预混火焰传播的模拟效果可为模型的选择和发展提供依据。通过实验、模拟和理论研究障碍物管道内的预混火焰传播过程并进行定性和定量分析,对理解和认识预混火焰的传播过程具有科学意义,对灾害的控制、预防和能源高效、清洁利用也有现实意义。

第 2 章 可燃预混气体燃烧研究进展

预混火焰在燃烧之前可燃气体和氧化剂已经完全混合至分子尺度。依据不同的燃烧机制,预混火焰可分为层流预混火焰和湍流预混火焰。认识和理解预混燃烧的特征具有重要的现实和理论意义。例如,探究火焰消耗预混气体的速率,火焰面的厚度,气体组分、当量比、初始温度和初始压力等条件对预混火焰有什么影响,如何有效阻止火焰发展并实现高效、清洁的燃烧等一系列科学问题,都需要对预混火焰做进一步的研究。

2.1 预混火焰

2.1.1 层流预混火焰传播理论

在充满预混可燃气体的燃烧设备内,通过引入外来热源使可燃气体局部先行着火,在着火区会形成一层相当薄的高温燃烧区域,称为火焰面。火焰面是一个分界面,其两侧分别是燃烧产物和未燃预混气体。火焰面会向未燃部分输送热量及活性粒子,逐渐把燃烧扩展到整个未燃区域。随着时间推移,火焰面会在预混气体中不断扩展,呈现火焰传播现象。按可燃气体的流动特性,可分为层流火焰和湍流火焰。图 2.1 为 Hayakawa 等^[9]利用高速纹影拍摄到的层流预混火焰。

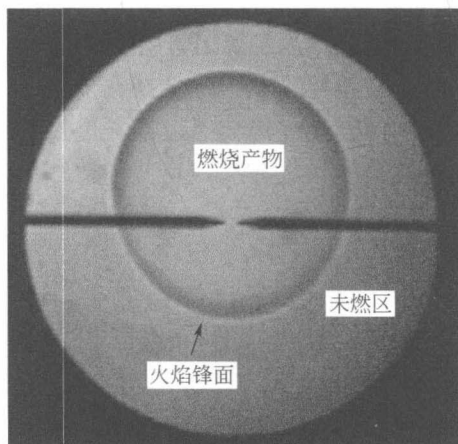


图 2.1 层流预混火焰高速纹影图

层流火焰是火焰面在可燃气体混合物中的逐层传播现象。层流火焰传播是通过分子之间的传递完成的,并受到燃烧产物导热性和扩散性的制约。图 2.2 为 Barnard^[10] 提出的层流预混火焰结构示意图,显示了各组分和温度在火焰燃烧面附近的典型分布。从左到右,依次为冷反应物区、预热区、燃烧反应区和产物区。在火焰前锋面内可燃气体热解分离,但很大一部分的化学反应速率很低,这部分称为预热区。化学反应主要集中在很窄的区域内进行,这个狭窄区域称为燃烧反应区,预混可燃气体经过燃烧反应区后,95%~98%都会发生燃烧反应。

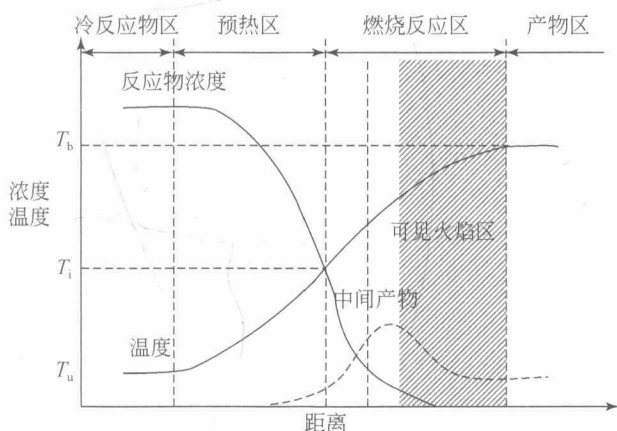


图 2.2 层流预混火焰结构示意图

1) 层流火焰传播理论

目前层流火焰传播理论主要有两种:火焰传播的热理论和火焰传播的扩散理论。

(1)热理论。火焰面的移动取决于燃烧反应的放热及其向未燃气体的热传导。热理论并不否认活性中心的存在及其扩散,只是认为燃烧过程中产生的活性中心属于反应放热率的范畴。

(2)扩散理论。燃烧反应的本质是链式反应。由于活性中心的存在,未燃预混气体会发生链式反应,进而生成燃烧产物。因此,火焰在空间上的移动是活性中心向新鲜预混气体扩散引起的。

2) 层流火焰传播速度

层流火焰传播速度是最基本的火焰参数,也是研究复杂燃烧工况的基本元素。例如,湍流燃烧可以假设为燃烧反应发生在局部层流小火焰内部,湍流对层流火焰起褶皱变形作用。目前,国内外学者测量层流火焰速度的装置主要有本生灯^[11]、定容爆炸球^[12]、对冲火焰燃烧器^[13]、一维稳定火焰燃烧器和对外膨胀火焰燃烧室。以对外膨胀火焰燃烧室为例,采用线性外推法说明层流火焰传播速度的求解过程。

$$S_N = \frac{dr}{dt} \quad (2.1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} \quad (2.2)$$

$$S_L - S_N = L_b \epsilon \quad (2.3)$$

式中, S_N 为火焰传播速度; r 为膨胀球半径; ϵ 为火焰拉伸率; A 为火焰燃烧表面积; S_L 为层流火焰传播速度。

值得注意的是, 层流火焰传播速度和火焰拉伸率的外推关系本质上并非线性^[14,15], 这导致实验测量结果偏高。图 2.3 为 Chen^[16] 统计的常压下甲烷-空气层流火焰传播速度。

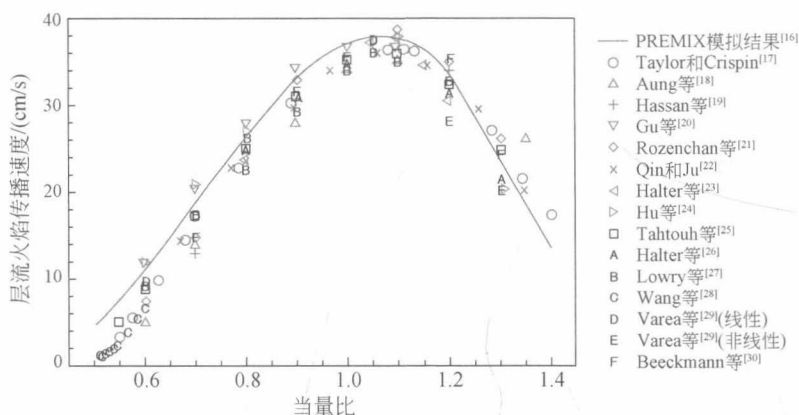


图 2.3 常压下甲烷-空气层流火焰传播速度

3) 层流预混火焰厚度

火焰锋面是已燃气体和未燃气体的分界面, 也是可燃气进行剧烈反应的区域。火焰厚度包括预热区和反应区两部分, 一般在 1mm 以内^[11,12]。根据相似原理, 层流预混火焰厚度可由式(2.4)计算^[13]:

$$\delta_L = \frac{\lambda_u}{\rho_u c_p S_L} \quad (2.4)$$

式中, S_L 为层流火焰传播速度; ρ_u 为未燃气体的密度; c_p 为比定压热容; λ_u 为导热系数。

由这种方法计算得到的火焰厚度比实际火焰厚度小^[13], 更贴合实际的层流火焰厚度可以通过温度分布获得:

$$\delta_L = \frac{T_2 - T_1}{\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial x}\right|\right)} \quad (2.5)$$

式中, T_2 为绝热火焰温度; T_1 为可燃气体的初始温度。

层流火焰传播速度和初始条件之间的关系式^[31]为

$$S_L = \left\{ \frac{\alpha}{\tau_{\text{chem}}} \left(\frac{T_P - T_{\text{ig}}}{T_{\text{ig}} - T_r} \right) \right\}^{1/2} \quad (2.6)$$

式中, α 为热扩散系数; T_P 为燃烧产物温度; T_{ig} 为预混气体的点火温度; τ_{chem} 为化学反应时间尺度; T_r 为未燃气体温度。

层流火焰厚度和层流火焰速度之间存在如下表达式:

$$Re_f = \frac{\delta_l S_L}{\nu} \approx 4 \quad (2.7)$$

式中, Re_f 为火焰的雷诺数; δ_l 为火焰厚度; ν 为动力黏度。

层流火焰传播速度理论值常可通过简化条件计算得到, 与实验测量结果会存在一定的差异。值得注意的是, 在早期阶段, 由于未量化火焰拉伸效应, 利用不同测量方法得到的层流火焰传播速度的差值可达 $\pm 25 \text{ cm/s}$ 以上, 如图 2.4 所示。Wu 和 Law^[32] 最先考虑拉伸效应对测量层流火焰传播速度的影响, 并提出了一种线性方法, 在此之后, 不同实验测量结果之间的差值降低到了 $\pm 8 \text{ cm/s}$ 以内。随后, Chen^[33] 通过理论和数值模拟, 指出非线性方法更为适用于具有较小或较大刘易斯数 (Lewis number, Le) 的预混气体, 可将不同实验方法的测量差值降低到 $\pm 2 \text{ cm/s}$ 以内。

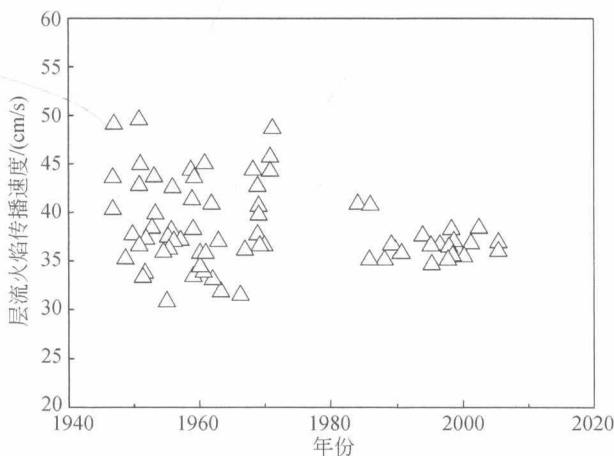


图 2.4 测量得到的甲烷-空气层流火焰传播速度^[34]

实际条件下的预混燃烧大多处于高压环境, 近年来, 高压化学动力学的建模成为燃烧科学的研究热点^[35,36], 这也为精确测量高压条件下的层流火焰速度提出了新的要求。层流火焰速度与火焰压力之间的关系为

$$S_L = S_{L0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\beta_1} \quad (2.8)$$

式中, S_{L0} 为参考压力 P_0 下的层流火焰传播速度; P 为火焰处气体压力; β_1 为全局