

现代工业炉燃烧技术

中国金属学会 冶金继续教育丛书

科学出版社

郭伯伟 高泰荫 蒲宗昭 编著

1109587

冶金继续工程教育丛书

现代工业炉燃烧技术

郭伯伟 高泰荫 薄宗昭 编著

科学出版社

1 9 9 4

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是“冶金继续工程教育丛书”之一。

本书阐述工业炉燃烧技术,包括燃烧过程基本理论,气体、液体和固体燃料燃烧的基本原理、方法及燃烧装置,燃烧质量检测计算方法,燃烧污染及防治,以及燃烧控制方法和系统。书中着重对基本概念和实用技术进行简明扼要的叙述,并且突出介绍了上述各方面对工业炉有实用价值的新发展,为读者掌握和进一步开发现代工业炉燃烧技术提供基本知识。

本书可作为冶金、机械、化工、轻工、建材、动力等部门从事工业炉热工和燃烧技术方面工作的科技工作者继续教育的教材或自学读物,也可供热能工程、工程热物理等专业的大专院校师生和研究、设计人员参考。

冶金继续工程教育丛书

现代工业炉燃烧技术

郭伯伟 高泰荫 薄宗昭 编著

责任编辑 陈永锵 李雪芹

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1994年7月第一次印刷 印张: 7 3/8

印数: 1—3000 字数: 176 000

ISBN 7-03-004158-5/TF·25

定价: 10.90 元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义，希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事
冶金工业部副部长

徐大珪

一九八八年十二月

前 言

根据“冶金工程师继续教育方案”的要求，我们编写了这本书，对工业炉燃烧技术，特别是对在该领域的新发展作了概括介绍，以满足工业炉热工科技工作者在燃烧技术方面加深和更新知识的需要。

燃烧过程是以燃料供热的各种工业炉内的主要过程，它不仅对炉内的热工过程有决定性的作用，而且对炉子的产量、质量、寿命以及能源消耗等经济技术指标有直接影响。因此，为实现炉内燃烧过程而应采取的燃烧技术，便常常成为生产中的关键技术，受到人们的高度重视。人们认识到，不论从总体上讲还是就每一座炉子而言，工业炉的完善和发展都是以燃烧技术的完善和发展为前提、为条件的。并且，燃烧（包括工业炉内的燃烧）对大气的污染也已成为人们要迫切解决的问题之一。所以，以高效率、低污染为主要特征的现代燃烧技术的发展十分迅速。为了推动工业生产的进步，不断地总结和普及这些成果是十分必要的。本书便是从上述认识出发，力求将燃烧技术的基本知识和新发展介绍给读者。

但是，必须说明，燃烧技术形式繁多，内容复杂，在本书这样有限的篇幅中是不可能对有关技术都作详细介绍的，而且，本书只是一本教材性的读物。我们希望读者能通过本书的学习在有关基本概念和燃烧技术方面有所收获，提高这方面的分析问题和解决问题的能力，并有可能在此基础上研究、开发出所需要的、新的、更先进的燃烧技术。

本书要求读者具有一定的燃料燃烧、流体力学、传热学和工业炉等方面的专业基础，即本书是在这些基础上进行论述的。全书共分7章。第1章介绍工业燃烧过程的基本理论，通过对燃烧理论的深入理解，以提高对实际技术问题的理论

• 1 •

分析能力，这是掌握和开发燃烧新技术所必需的。第2、3、4章分别介绍气体、液体和固体燃料的燃烧，包括燃烧过程的基本原理、燃烧方法的基本特点和燃烧装置的主要类型与结构。不同的工业炉对燃烧技术的要求不同，因此现有的，即使被认为先进的燃烧技术，其实用范围以及可能表现出来的优越性，也是相对的。常规的燃烧技术在大多数条件下仍然具有实用性和先进性，而且是发展新的燃烧技术的基础。在这几章中，对常规燃烧技术作了简要介绍，并选择当今对工业炉较有实用价值的新技术作了重点介绍。第5章介绍燃烧过程质量的检测控制计算方法，这是为了控制和改善炉内燃烧过程必须掌握的手段。第6章简要介绍了燃烧污染物的生成及防治方法。燃烧与环境关系密切，工业炉科技工作者有必要更多地掌握这方面的知识。第7章是燃烧控制，主要介绍通过控制空气消耗系数，实现燃烧质量控制，包括控制的原理、方法及典型系统。燃烧过程的自动控制是现代工业炉以及燃烧技术发展的主要方向之一，随着生产技术的提高和计算机应用的普及，它将会有更大进展。

本书介绍了作者近年来的有关研究成果，并吸收了前人和同行们的宝贵经验。全书由东北大学郭伯伟（第3、4、5章）、高荫荫（第1、7章）和北京科技大学薄宗昭（第2、6章）共同编写，由郭伯伟主编。本书以叙述为主，突出基本概念和过程分析，避免过多的数学推导。这样，本书既可作为热能工程、钢铁冶金、有色冶金、轧钢、热处理等专业继续教育的教材，也可供其他有关专业科技人员、管理干部和大专院校师生参考。书中难免有不足之处，热诚欢迎读者批评指正。

编著者

1993年10月

目 录

序

前言

1 工业燃烧过程基本理论	(1)
1.1 工业燃烧方式	(2)
1.2 气体燃料的燃烧过程	(5)
1.3 液体燃料的燃烧速度	(48)
1.4 固体燃料的燃烧速度	(53)
2 煤气燃烧	(67)
2.1 煤气燃烧方法	(67)
2.2 有焰燃烧法	(69)
2.3 无焰燃烧法	(73)
2.4 高效燃烧技术及其装置	(76)
2.5 强化煤气燃烧的基本途径	(84)
3 重油燃烧	(89)
3.1 燃烧过程	(89)
3.2 油雾特性及火焰结构	(92)
3.3 重油燃烧器及油气两用燃烧器	(100)
3.4 油掺水乳化燃烧技术	(113)
3.5 重油磁化燃烧技术	(123)
4 粉煤燃烧	(134)
4.1 概述	(134)
4.2 煤的性质对燃烧过程的影响	(136)
4.3 燃烧速度及火焰长度	(145)
4.4 粉煤燃烧装置	(152)

4.5	水煤浆燃烧技术	(161)
5	燃烧质量检测计算	(167)
5.1	概述	(167)
5.2	燃烧完全系数的检测计算	(168)
5.3	不完全燃烧热损失的检测计算	(172)
5.4	空气消耗系数的检测计算	(173)
5.5	烟气分析及校验方程	(181)
6	习题	(186)
6	燃烧污染及其防治	(189)
6.1	污染发生源	(189)
6.2	硫的氧化物	(190)
6.3	氮的氧化物	(194)
6.4	烟尘	(203)
6.5	一氧化碳和二氧化碳	(206)
7	燃烧控制	(207)
7.1	控制空气消耗系数的意义	(207)
7.2	低空气消耗系数燃烧过程控制要素	(213)
7.3	低空气消耗系数燃烧控制系统	(223)
7.4	燃烧安全控制	(237)
主要参考文献		(242)

工业燃烧过程基本理论

燃烧是十分广泛且与人类关系非常密切的现象,广义而言,它是指一种被称作燃料的物质,通过急骤分解、化合或氧化反应而释放化学能、核能或热能的现象。通常所说的燃烧一般为大量放热,且由于放热而自发地使反应持续下去的现象。从诸如生活用的蜡烛等小规模燃烧到产生汽车发动机高速转动力和宇宙火箭千万吨推力的大规模燃烧,其形态多种多样。其中,燃烧过程的放热直接为工业生产所利用的燃烧,例如,工业窑炉、锅炉等设备之中的燃烧,通常称为工业燃烧。用于工业燃烧的燃料(区别于核能物质或火箭推进剂等特殊燃料)称为工业燃料。

从能量利用的角度看,工业燃烧过程以热能的释放为其特征,过程的放热特点由燃料与空气(氧)的物理混合和化学反应综合决定。就其过程的基本特征而言,一般在常压下燃烧过程呈火炬形态(煤的层状燃烧除外),而热量就包含在气体反应生成物之中。由于现代工业所用能量的95%以上取自于燃料的燃烧,而几乎所有燃烧生成物又排放到自然环境之中,因而,从能量利用和环境保护的角度,掌握工业燃烧过程的基本规律非常必要。

燃烧过程受激烈的化学反应与流动、传热、传质等物理过

程综合制约,现象十分复杂。工业燃烧过程也是如此,在一定的反应动力学和热力学条件以及流体力学和传质学条件下,燃烧状态由反应物和生成物的物理混合扩散因素和化学反应速度与平衡因素所决定。因此,不同物态的工业燃料燃烧过程表现出不同的形态,即使是相同物态的工业燃料燃烧过程,也可能由于物理混合条件或化学反应动力学条件的差异,而表现出不同的状态。

1.1 工业燃烧方式

化学反应的反应物物态不同,主导过程的传质机理和反应机理也有本质的差异,完成反应过程的方法也不一样。在工业燃烧过程中,氧化剂常常是空气。呈气体、液体或固体等不同物态的工业燃料与气态的氧反应具有各自的燃烧方式。

1.1.1 气体燃料

气体燃料的燃烧方式有预混燃烧和扩散燃烧之分。

预混燃烧是指在发生反应之前将燃料与完成反应所必须的氧或空气充分混合成预混气,预混气燃烧时,形成被称为火焰面的高温反应面,且火焰面有自行传播的特点。当用烧嘴连续地供给可燃预混气使其正常燃烧时,就将形成稳定预混火焰。把预混气封入容器,用电火花或其他点火源点火,则随火焰的传播,密闭容器中的压力急骤升高,这叫定容燃烧。如果把封入容器的预混气均匀加热,当达到某一温度以上,经过短暂的时间滞后,整个密封容器中的预混气同时着火,这种现象称为爆燃。气体燃料的稳定预混火焰是工业燃烧的一种方式,而定容过程则表示出动力燃烧的本质特点。

扩散燃烧是指将燃料和氧(或空气)这两种反应物质的一

种喷入另一种之中,或者将燃料和氧(或空气)从分别的喷口喷出,使其在二者的界面发生反应的燃烧过程,即燃料和氧向高温的化学当量面扩散而形成火焰。显然,与预混燃烧不同,扩散燃烧的火焰面不传播。

与扩散燃烧相比,预混燃烧的反应物的混合提前在过程发生之前完成,成为燃烧过程的准备,一旦具备燃烧反应发生的热力学条件,过程将按反应动力学的基本规律进行。因此,对工业预混燃烧而言,基本理论要回答的问题是:燃烧反应发生的热力学条件,过程进行的动力学规律以及火焰稳定的必要因素。其中,反应的动力学规律表达燃烧速度及反应物、生成物的平衡关系,而火焰的稳定问题常常是强化工业预混燃烧过程的关键所在。

扩散燃烧的情况则不同,由于燃烧反应物质的物理混合速度与一般燃烧反应速度相比慢得多,因此,虽然同样存在前述预混燃烧中的基本理论问题,但强化工业扩散燃烧的根本途径在于混合过程的强化。

如果在气体燃料中先混入使其燃烧所需氧(或空气)的一部分制成混合气,再经喷口喷出与所需的其余氧气扩散燃烧,则既可使火焰比上述的预混燃烧易于稳定,又可使混合过程比纯扩散燃烧更为强化。因此成为工业燃烧的又一种方式,该方式称为部分预混燃烧。

1.1.2 液体燃料

一般而言,液体燃料燃烧并非呈液相反应,而是先蒸发成油蒸气,油蒸气再与氧反应完成燃烧过程。依蒸发方法不同,燃烧方式有液面燃烧、灯芯燃烧、喷雾燃烧和蒸发燃烧之分。

液面燃烧是在容器中的液体燃料表面上进行的燃烧,是靠火焰向液面传热蒸发的蒸气与空气接触而在油面上方进行

的扩散燃烧。灯芯燃烧是靠灯芯把液体燃料吸上来,再经灯芯蒸发成蒸气而进行的扩散燃烧。这两种燃烧方式的反应速度较小,前者如油船溢漏而在海面上形成的火灾燃烧;后者如油灯的照明燃烧。两者在工业上都很少应用。

工业上最常用的是用喷雾燃烧的方式组织液体燃料的燃烧,即将燃料微粒化成数微米至数百微米的油滴,靠蒸发表面的骤增使其在很大反应速度下燃烧。

以上燃烧方式中,燃料蒸气的蒸发过程是与燃烧过程同时进行的。此外还有利用燃烧热而使液体燃料在蒸发管中蒸发,蒸发后的油蒸气像气体燃料那样燃烧的方法,称为蒸发燃烧。当燃料中的重质碳氢化合物含量较高时,由于油的蒸发会产生重碳氢化合物的沉积而容易造成蒸发管堵塞,因此,这一方法的燃烧强度虽然很大,但对使用的燃料种类要求严格。

1.1.3 固体燃料

固体燃料的工业燃烧主要是包括表面反应的分解燃烧。在燃烧过程中,一部分燃料受热分解成可燃性气体,这些分解成气态的成分在离开固体表面的同时形成火焰而进行气相燃烧,其后残留成固态的成分(主要是碳)再进行表面反应。表面反应是一种扩散燃烧,它包括氧扩散到固体燃料表面(包括像焦炭那样多孔质燃料的气孔内部表面)而发生反应,反应产物再扩散离开表面的过程。

煤的工业燃烧是典型的分解燃烧过程。当分解温度低时,分解成气态的成分可能会出现不能形成火焰面燃烧的情形,与普通的分解燃烧相区别,称这种情形下的燃烧过程为表面冒烟燃烧,这是一般工业燃烧中的非正常情况。

总之,由于燃烧反应物(燃料和氧化剂)的物态组成不同,则过程发生的流体力学和传热传质学机理不同,因而讨论燃

烧速度的方法亦不同。即使是一样的燃烧反应物物态组成,由于过程包括了微观混合、燃烧反应、传热传质等单元环节,赋与物理化学条件的差异,单元环节因素对综合过程的影响程度不同,导致讨论燃烧速度的着眼点亦不相同。一切工业燃烧过程以燃料的节约和排放污染物的减少为前提,这些均与燃烧强度有关。显然,为在不同工艺要求条件下实现高质量的燃烧过程,需要掌握关于燃烧反应速度的基本知识。

1.2 气体燃料的燃烧过程

煤气是一种气体燃料,它的燃烧是在气相均相系统中进行的。除此而外,即使在像油和煤粉那样的气-液,气-固界面上所发生的非均相燃烧中,火焰也是在气相中形成的,因此,气相燃烧是各种燃烧形态中最一般的燃烧。

1.2.1 燃烧速度的概念

如图 1-1 所示,将燃料和氧化剂的混合气(可燃混合气)点火,则发生局部的燃烧反应,产生的热量和游离的活性基向周围传递,反应向可燃气中扩展开去。燃烧反应通常在一定范围内发生,称为火焰带或燃烧带,这一火焰带自点火源向四周

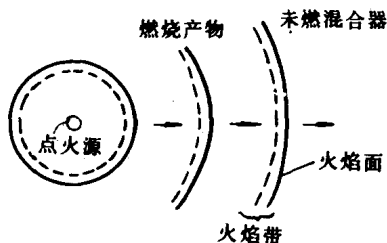


图 1-1 燃烧波的传播

扩展,称这种火焰带的传播为燃烧波,而把其前缘叫作火焰面。

火焰面的移动速度通常叫作火焰传播速度,亦即燃烧速度,这是包括了由燃烧产物体积膨胀而引起的气体运动等因素在内的速度。因此,燃烧的实际传播速度定义为:燃烧在自身的火焰面的法线方向传播时的相对于未燃混合气的速度。

层流预混火焰的燃烧速度(层流燃烧速度)为可燃预混气的特性值,它决定于系统的温度和压力,与反应速度有密切的关系。一些有代表性的预混气的层流燃烧速度见图 1-2 和图 1-3。从图中可见,除 H_2 和 CO 以外,其他可燃气体的层流燃烧速度都几乎在理论空气量附近有最大值。而除 H_2 和 C_2H_4

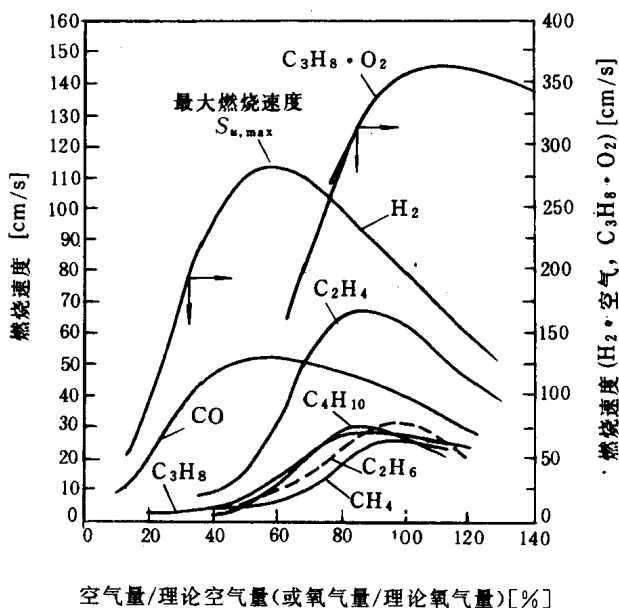


图 1-2 可燃预混气的层流燃烧速度

(1 大气压, 室温)

外,通常碳氢化合物-空气预混气系统的最大燃烧速度大约在 30—50 cm/s 左右。

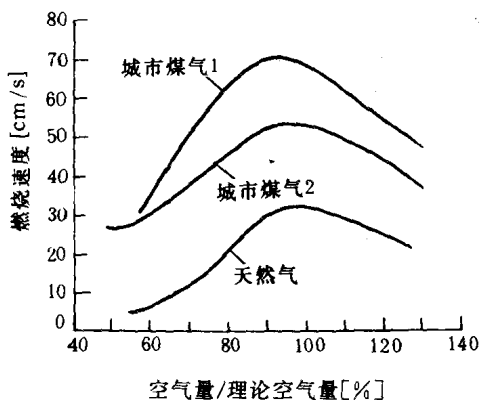


图 1-3 城市煤气、天然气的层流燃烧速度

(1 大气压, 室温)

城市煤气 1: 高热值 20.9 MJ/m³, 比重 0.50;

城市煤气 2: 高热值 20.9 MJ/m³, 比重 0.69

对于紊流预混火焰而言, 由于在层流火焰中发生的热及活性基输运过程的基础上, 附加了紊流脉动作用, 其燃烧速度(紊流燃烧速度)很容易达到 10 倍于层流燃烧速度的数值。

传播速度达到音速以上的传播, 称为爆震波传播, 这时速度甚至可达 2000—3000 m/s。爆震波亦可称为伴随化学反应的冲击波, 这时的传播方式变为由冲击波加热未燃的可燃混合气而发生化学反应, 它依其反应热保持冲击波的正常速度。

无论是燃烧波和冲击波, 就其本质而言火焰面具有多维非定常结构, 这一领域中至今仍有许多理论问题未被解决。

如前所述, 均相燃烧过程依燃料与氧化剂是否混合而产生预混火焰和扩散火焰, 二者的主要特征在于: 预混火焰具有传播性, 以火焰带为界分为未燃区和燃烧区, 燃料、氧化剂的

性质及其二者的混合比一定时火焰的特性(燃烧速度、绝热火焰温度等)也一定;扩散火焰则不同,由于燃料和氧化剂相互自两个区域扩散而形成火焰带,所以不具有像预混火焰那样的传播性,且燃烧取决于扩散过程。

1.2.2 层流预混火焰

1. 一维定常火焰

为了对层流燃烧速度进行理论推导,通常使用一维定常火焰作为简化模型,即火焰相对于未燃混合气单一方向传播,且形成不随时间变化的平面火焰。

关于一维定常火焰传播的研究,较早有捷尔道维奇(Зельдович)等人完善的热理论,其后有坦福德(Tanford)和皮斯(Pease)的扩散理论,以及考虑导热和扩散两者作用的综合理论等。

(1) 热理论

所谓热理论是基于火焰传播的基本过程为向未燃混合气的导热而提出的理论。

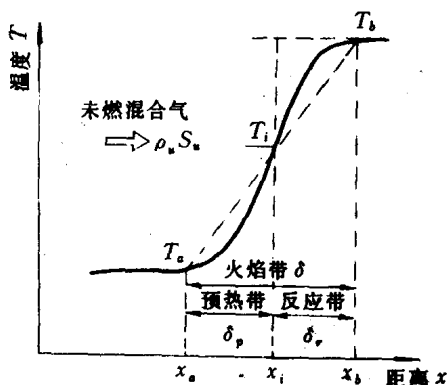


图 1-4 层流预混火焰的热理论模型

图 1-4 表示出一维定常层流预混火焰带内的温度分布。温度为 T_u 的可燃混合气以流速 S_u 自左侧供给。把由反应带的导热而达到着火温度 T_i 的被预热区域叫作预热带,其厚度表示为 δ_p 。把由于自身的反应热而达到绝热火焰温度 T_b 的升温区域叫作反应带,其厚度表示为 δ_r 。火焰带即由预热带和反应带组成。根据预热带的热平衡,自 $x=x_i$ 面导热的热收入等于未燃混合气的焓增,可写出:

$$-\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_i} + C_p \rho_u S_u (T_i - T_u) = 0 \quad (1-1)$$

式中 λ ——未燃混合气的平均导热系数;

ρ_u ——平均密度;

C_p ——平均比热。

这些参数均不取决于温度而取定值。

如果将图中所示的温度分布近似地视为线性关系,则

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_i} \approx \frac{(T_i - T_u)}{\delta_p} \quad (1-2)$$

式(1-1)可写成:

$$-\lambda \frac{(T_i - T_u)}{\delta_p} + C_p \rho_u S_u (T_i - T_u) = 0 \quad (1-3)$$

因此,有

$$\delta_p = \frac{\lambda}{C_p \rho_u S_u} \quad (1-4)$$

火焰因未燃混合气供给速度与层流燃烧速度相平衡而呈定常状态, S_u 即为燃烧速度。可见,层流火焰预热带的厚度与燃烧速度成反比。

另一方面从反应带来看,其温度梯度可表示为:

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_i} \approx \frac{T_b - T_i}{\delta_r} \quad (1-5)$$