

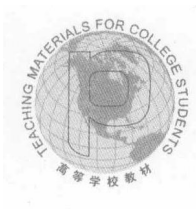


高等学校教材

工程燃烧原理

杨肖曦 编著

中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

工程燃烧原理

杨肖曦 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程燃烧原理/杨肖曦编著. —东营:中国石油大学出版社, 2008. 3

ISBN 978-7-5636-2360-0

I. 工… II. 杨… III. 燃烧理论—高等学校—教材
IV. O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 033528 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 工程燃烧原理

作 者: 杨肖曦

责任编辑: 刘 洋 (电话 0546—8392860)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 山东省东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546—8392791, 8392563)

开 本: 180×235 印张: 17 字数: 368 千字

版 次: 2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

前言

燃烧过程是一种复杂的物理、化学过程,涉及化学、流体力学、传热传质学、热力学等理论。燃烧技术内容丰富、发展迅速。本书力图将燃烧基础理论与燃烧应用技术相融合,并注重内容的系统性与完整性,加强与相关专业的联系。

全书共分7章。第1章介绍了气体、液体、固体燃料的组成、性质和种类。第2章介绍了燃料的燃烧计算。第3章介绍了燃烧反应动力学基础。第4章以预混可燃气体为例,介绍了着火理论、火焰传播、火焰的稳定性,并介绍了气体燃料的燃烧方式及其燃烧设备的结构、工作原理和设计计算方法。第5章介绍了液体燃料的燃烧方式、液滴燃烧基本规律和雾化燃烧特性,液体燃料燃烧设备的结构、工作原理和设计计算方法。第6章介绍了固体燃料的燃烧基本规律和燃烧方式、固体燃料燃烧设备的结构和工作原理。第7章介绍了燃烧过程的噪音和污染物的生成及其预防措施。书中还介绍了发展较快的燃烧技术,如循环流化床燃烧技术和煤的气化技术等。各专业可以根据需要选取相应的内容。

本书第1至第6章由杨肖曦编写,第7章由宋文霞编写。张凯、周圆圆、王淑娟、牛振琪等同学参加了书稿的校对工作,在此深表感谢。

山东大学马春元教授认真审阅了书稿,提出了很多具体的宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,希望读者批评指正。

编 者

2007年10月

目 录

绪论	1
第 1 章 燃料	4
1.1 固体燃料	4
1.1.1 煤的形成	4
1.1.2 煤的化学组成	5
1.1.3 煤的成分表示方法及其换算	7
1.1.4 煤的使用性质	10
1.1.5 我国煤的分类	15
1.2 液体燃料	18
1.2.1 液体燃料的化学成分及其表示方法	19
1.2.2 石油的加工及其产品	19
1.2.3 石油产品的理化性质	23
1.3 气体燃料	27
1.3.1 气体燃料的化学成分及其表示方法	27
1.3.2 气体燃料的发热量	29
1.3.3 气体燃料的种类	29
第 2 章 燃料的燃烧计算	34
2.1 燃料燃烧所需空气量计算	34
2.1.1 理论空气量	34
2.1.2 实际空气量	36
2.2 完全燃烧时烟气量的计算	38
2.2.1 液体燃料与固体燃料烟气量的计算	38
2.2.2 气体燃料烟气量的计算	40
2.3 烟气分析及其应用	40
2.3.1 烟气成分分析	40
2.3.2 根据烟气分析计算烟气体积	42
2.3.3 燃烧方程式	43
2.3.4 过量空气系数的确定	46
2.4 燃烧反应的热平衡	47
2.4.1 燃料的燃烧温度	47

2.4.2 燃烧温度的计算	48
第3章 化学动力学基础	52
3.1 化学反应速率	52
3.2 质量作用定律	54
3.3 阿累尼乌斯定律	55
3.4 影响化学反应速度的因素	57
3.5 链锁反应	60
第4章 气体燃料燃烧	64
4.1 气体燃料燃烧的基本形式	64
4.2 预混可燃气体的着火	66
4.2.1 着火方式概述	66
4.2.2 热自燃理论	67
4.2.3 强迫着火	75
4.3 预混可燃气体中的层流火焰传播	79
4.3.1 层流火焰传播的概念	79
4.3.2 层流火焰传播理论	81
4.3.3 影响层流火焰传播速度的因素	84
4.4 预混可燃气体中的湍流火焰传播	88
4.4.1 湍流火焰特点及实验结果	89
4.4.2 湍流火焰传播理论	90
4.5 扩散燃烧基础	93
4.5.1 层流扩散燃烧火焰	93
4.5.2 湍流扩散燃烧火焰	95
4.6 火焰的稳定性	96
4.6.1 预混气火焰的稳定	97
4.6.2 扩散火焰的稳定	106
4.7 气体燃料燃烧设备	107
4.7.1 扩散式燃烧器	108
4.7.2 部分预混燃烧器——大气式燃烧器	124
4.7.3 完全预混式燃烧器	127
4.7.4 气体燃料的置换	136
第5章 液体燃料燃烧	144
5.1 液体燃料的燃烧方式	144
5.2 液滴燃烧的基本规律	146
5.3 雾化燃烧过程的组织	147
5.4 油的雾化	152
5.5 油喷嘴	157

5.5.1	机械雾化油喷嘴	157
5.5.2	气体介质雾化油喷嘴	160
5.5.3	转杯式机械雾化油喷嘴	166
5.5.4	燃油喷嘴的设计计算	167
5.5.5	燃油掺水乳化燃烧	175
第 6 章	固体燃料燃烧	178
6.1	煤的燃烧过程	178
6.2	碳和氧的反应机理	179
6.3	碳粒的燃烧理论	181
6.3.1	碳粒燃烧速度	181
6.3.2	吸附与解吸对碳粒燃烧的影响	183
6.4	碳粒燃尽所需时间	185
6.5	固体燃料的燃烧方式和燃烧装置	186
6.5.1	层状燃烧	186
6.5.2	火室燃烧	203
6.5.3	旋风燃烧	219
6.5.4	流化燃烧	220
6.5.5	煤的气化	237
6.5.6	水煤浆燃烧	244
第 7 章	燃烧的污染及防治	249
7.1	燃料燃烧造成的空气污染	249
7.2	烟尘的形成与防治	249
7.2.1	烟尘的生成机理	249
7.2.2	烟尘的危害	250
7.2.3	减少烟尘的措施	250
7.3	硫氧化物 SO_x 的生成与防治	251
7.3.1	硫氧化物的生成	251
7.3.2	防治硫氧化物污染的措施	253
7.4	氮氧化物 NO_x 的生成与防治	255
7.4.1	氮氧化物的生成	255
7.4.2	控制氮氧化物生成的燃烧技术	257
7.4.3	烟气脱硝法	259
7.5	燃烧噪声与控制	259
7.5.1	燃烧噪声的类型	260
7.5.2	燃烧噪声的控制方法	261
参考文献		262



能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。能源、材料、信息被视为现代化国家的三大支柱,能源、粮食、人口、环境则被看做人类面临的四大难题。任何一个国家都把能源看成是国民的基本需求,看成是支持国家经济增长和提高人民生活水准的一个基本组成部分。

人类使用的 90% 以上的能源是由植物体燃料和矿物体燃料的燃烧提供的,燃料燃烧是人类获得热能的主要手段。热能一方面可以直接用于人类的生产和生活,另一方面可以转化为其他形式的能量,如电能、机械能等。燃料及其燃烧广泛应用于国民经济的各个领域。研究和掌握燃料的生产及其燃烧过程,把燃料的热能尽可能多地释放出来并加以合理利用,对国民经济的发展和人民生活水平的提高有着巨大的意义。

燃烧是燃料和氧化剂两种组分在一定条件下激烈地发生放热化学反应的过程,从而将燃料的内能转化为热能。它常常伴随着发热、发光的过程,即所谓“火”的现象。此化学反应在许多场合下是氧化反应,含有活泼氧原子或类似于氧原子的组分称为氧化剂(氧、发烟硝酸、双氧水等),被氧化剂氧化的物质称为燃料(碳、氢、燃油、天然气、木材、钾、镁、硫、硼等),反应所生成的物质称为燃烧产物。

在历史上,人们曾把燃料的燃烧看做一种化学现象。但是,燃烧化学反应需要具有一定的反应条件,例如反应物质的浓度和温度,这就与气体运动、分子扩散、热量传递等物理因素有关,这些因素都将影响燃料燃烧的机理和燃料的燃烧程度。因此,现代燃烧学认为,从整个燃烧过程来看,燃烧是一种复杂的物理、化学的综合过程,它包括燃料和氧化剂的混合、扩散过程,预热、着火过程以及燃烧、燃尽过程。

人类在距今 100 多万年前开始使用火,火是人类最早控制的自然力,是人类出现的标志之一。人类社会发展的每一个里程碑,如陶器、铜器、铁器、蒸汽机、工业化、电气化及空间技术的发展都与燃烧技术的进步密切相关。可以说,火的历史就是人类社会进步的历史。

古代的人们在用火的同时,产生过不少有关火的学说。如我国“五行说”中的“金、木、水、火、土”中有火,古希腊“四元说”中的“水、土、火、气”中有火,古印度“四大说”中的“地、水、火、风”中也有火,都认为火是构成万物的本源物质之一。17 世纪以后,工业的发展,特别是冶金和化工工业的发展,使火的使用范围和规模扩大了,人们更迫切地想弄清楚火及燃烧现象的本质。

17 世纪中叶到 18 世纪中叶,欧洲曾流传着“燃素说”,并占统治地位。燃素说认为一



切与燃烧有关的化学变化都可以归结为物质吸收燃素与释放燃素的过程。这一学说能够解释许多燃烧现象,但是一些燃烧的本质问题尚不能说明。如燃素的本质是什么?为什么物质燃烧后质量反而增加?为什么燃烧使空气体积减小?

直到 18 世纪,随着一些重要的气体(例如碳酸气、氢气、氮气,尤其是氧气)的发现,科学的燃烧学说才得以建立。1777 年拉瓦锡(Lavoisier)通过实验观察,否认了燃素说的结论,提出了燃烧的氧学说,认为物质的燃烧是放出光和热的氧化反应。

19 世纪,随着原子、分子学说的建立,赫斯(Hess)和基尔霍夫(Kirchhoff)等人发展了热化学、化学热力学等,开始把燃烧过程作为热力学平衡体系来研究,从而阐明了燃烧过程中一些最重要的平衡热力学特性,如燃烧反应的热效应、燃烧产物平衡组分、绝热燃烧温度和着火温度等。从 20 世纪初到 30 年代,化学动力学的机理被引入燃烧的研究,建立了研究燃烧动态过程的理论,发展了燃烧反应动力学的链式机理。从 30 年代到 50 年代,前苏联的谢苗诺夫和泽尔多维奇等人从反应动力学和传热、传质相互作用的角度阐释了着火、火焰传播和湍流燃烧的规律。从 50 年代到 60 年代,冯·卡门(Von Karman)和钱学森等人提出用连续介质力学来研究燃烧的基本现象,这一方法逐渐发展成反应流体力学。

随着大型计算机的发展,20 世纪 70 年代初,斯帕尔汀(Spalding)等人比较系统地把计算流体力学的方法用于燃烧研究,建立了燃烧的数学模型方法和数值计算方法。与此同时,激光技术、现代质谱和色谱等各种现代化的测试手段的发展,使人们能够直接测得燃烧条件下的介质的速度、温度、组分浓度等参数,为更深入地研究燃烧机理奠定了基础。

燃烧学是研究燃烧过程基本规律及其应用技术的科学。燃烧学的内容包括两部分,即燃烧理论和燃烧技术。燃烧理论主要研究燃烧过程所涉及的各种基本现象,如燃烧反应的动力学机理,预混可燃气体的着火、熄火、火焰传播、火焰稳定及扩散火焰,液滴、碳粒的燃烧,煤的热解和燃烧,燃烧产物的形成机理等。它运用化学、传热传质学及流体力学的有关理论,说明燃烧的各种基本现象的物理化学本质。燃烧技术主要是应用燃烧基本理论解决工程技术中的各种实际燃烧问题,如对现有燃烧方法进行分析和改进,对新的燃烧方法进行探索和实践,扩大燃料的利用范围,提高燃料的利用率,改进燃烧设备的技术等。

燃烧学的研究方法包括理论分析和实验研究两种。尽管大型电子计算机的出现为通过理论解决实际问题奠定了一定的基础,但是在世界范围内,生产中提出的各种燃烧技术问题主要还是通过实验来研究解决的。燃烧理论分析的作用主要是为各种燃烧过程的基本现象建立和提供一般性的物理概念,从物理本质上对各种影响因素做出定性的分析,从而为实验研究和数据处理指出合理的方向。因此,运用正确的物理概念,通过实验取得定量的关系和结论,仍然是当前解决燃烧技术问题的主要手段。

近年来,随着我国生产的迅速发展和人民生活水平的提高,燃料的供应一度出现严重的短缺,这不仅使工业生产能力不能充分发挥,也使人民的生活受到影响。在燃料供应不足的同时,我国燃料浪费现象却相当严重,由于管理不善、经济结构不合理、技术设备落后

等原因,导致单位产品能耗较高,相当于我国每年浪费了一亿多吨标准煤。因此,大力开展节能十分重要,采用先进的燃烧技术和保证燃烧装置良好运行将起十分重要的作用,积极进行燃烧装置的技术改造、系统更新具有重要的社会经济意义。

控制燃烧污染已成为一个迫切需要解决的社会问题。我国的一次能源将长期以煤为主,但煤含有大量的灰分和有害杂质,且较难完全燃烧。许多以烧煤为主的地区均存在着严重的烟尘污染和有害气体污染。燃烧设备设计和运行的不合理则会引发事故。因此,应当围绕减少污染物的生成和排放、保证燃烧设备的安全运行开展燃烧新技术的研究。

许多工程燃烧过程具有极大的特殊性。有些要求在有限的空间内实现高强度燃烧,以提供强大的推力,例如飞机与火箭的发动机;有些要求达到足够高的温度,例如特种钢材的冶炼;有些通过燃烧加工或处理的物质具有较大的毒性或腐蚀性,其燃烧过程应当进行专门控制;有些燃料的热值过低或燃烧过程难以组织,例如重油、沥青,需要发展满足这些要求的燃烧方法。

此外,合理利用燃料,尤其是劣质燃料,也成为目前人们普遍关心的问题。应当重视燃料的分级使用,将优质燃料用在最需要的地方,同时研究开发劣质燃料的应用技术,提高燃烧装置对燃料种类的适应性,大力开展煤的气化和液化技术的研究。

各种火灾的产生、传播和预防也是当前燃烧科学的重要研究方向之一。

近年来,计算机与微电子技术获得了飞速发展,许多新型的电子仪表、探测元件、分析与处理仪器等可以准确、可靠、经济地用于燃烧过程自动化和智能化的监测和控制。采用这些新技术,能够大大加深对燃烧过程的认识。



第 1 章 燃 料

燃料按其物态可分为气体燃料、液体燃料和固体燃料。除核燃料外,它们主要是由埋藏于地层深处的古代动植物的残骸演变而成的。这些残骸在地壳压力的作用下,经过几千万年乃至几亿年的物理、化学、生物等变化阶段,形成了不同种类的燃料。

燃料按获得方式可分为天然燃料和人造燃料。天然矿物质燃料中的固体燃料主要是煤、油页岩,液体燃料主要是石油,气体燃料主要是天然气。人造燃料由天然燃料加工制成,供各个工业部门或人们生活使用。例如,由木柴、煤制成的木炭、焦炭、粉煤、型煤等,由石油、煤、油页岩提炼制成的汽油、煤油、柴油、重油、渣油、煤焦油等,由煤和石油制成的各种煤气、石油裂化气等。

在世界燃料构成中,各种燃料的使用比例是不断变化的。在 18 世纪和 19 世纪上半叶,人们感兴趣的燃料是木材,之后则是煤。20 世纪 50 年代,煤一度成为燃料的主角,之后其所占的比重日益下降,而石油所占的比重则日益增加。到了 80 年代,石油已成为燃料中的主角,但从世界燃料的使用远景看,煤的储量比石油大得多,因此,世界能源发展将进入一个新阶段,大力增产煤已成为当务之急。

从我国现状来看,21 世纪我国能源的主要来源仍将是煤(约占 70%左右),石油和天然气所占比例较低。在油气资源不足的情况下,石油应首先用于运输式和移动式动力设备,而在地面固定式动力设备和生产中应尽量使用煤,这就是我国燃料政策的出发点。因此,研究煤的燃烧和利用是我国热能工程技术人员面临的主要任务之一。

随着科学技术的发展,煤、石油和天然气已不仅是工业生产的热能来源,而且还是化学工业的宝贵原料。由于形成的原因、地质条件与年代的不同,燃料的种类、用途各不相同,在性质上也有明显的差异。燃料的种类、特性对燃烧设备的设计与运行有很大的影响,并与热工设备工作的安全性和经济性密切相关。为了有效地使用燃料、掌握生产工艺对燃料的技术要求,本章将分别介绍各种燃料的特点和使用性能。

1.1 固体燃料

固体燃料主要是煤。煤是棕色至黑色的可燃烧类似岩石的固体,是由多种有机物质和无机物质混合组成的十分复杂的固体碳氢燃料。

1.1.1 煤的形成

煤是远古植物遗体在地表湖沼或海湾环境中,经历复杂的生物化学变化逐渐形成的。

从动植物转变为燃料是一个漫长的过程,需经几万年甚至几亿年的时间,并经历一系列复杂的变化过程。煤的生成过程主要经历下述三个阶段:

(1) 植物质的堆积阶段。

(2) 菌解作用阶段。菌解是在隔绝空气的条件下,植物以细菌作用为主进行缓慢的分解而致腐烂的过程。在此过程中,植物中各有机物质发生分解,其中部分植物分解成腐殖酸,部分成为气体逸出(如 CO , CO_2 和 O_2 等气体)或溶于地下水而被带走。此外,还有部分木质素、纤维素和树脂等没有分解,保留着原有植物形态(如根、茎、叶及树皮等)。经过这一过程后,残留体中的氢、氧相对减少,而碳素含量相对增加,这就完成了第一阶段——泥煤的形成过程。

(3) 碳化作用阶段。泥煤形成后,若所在地区的地质情况发生变化(如地壳下沉等),泥煤床被岩石层覆盖,在地热和压力的作用下泥煤进一步变质,逐渐变成坚实的物质,这就形成了褐煤。所谓“煤的变质”,就是指煤在形成过程中受到压缩而坚固,同时其中的水分及挥发物不断挥发、减少,因而在这个变化过程中,碳的含量逐渐增加,而氧、氮、氢的含量则相对减少。这一过程通称为煤的碳化过程,这种碳化过程由浅而深地进行,从而形成了各类品种不同的煤,依次为泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤等。

1.1.2 煤的化学组成

各种煤都是由某些结构极其复杂的有机化合物组成的,有关这些化合物的分子结构至今还不十分清楚。根据元素分析的结果,煤的主要可燃元素是碳,其次是氢。少量的氧、氮、硫与碳和氢一起构成可燃化合物,称为煤的可燃质。除此之外,在煤中还含有一些不可燃的矿物质灰分(A)和水分(W),称为煤的惰性物质。一般用煤的碳、氢、氧、氮、硫各元素的分析值及水分、灰分的质量分数来表示煤的化学组成。各组分的主要特性如下:

1) 碳

碳是煤中的主要可燃元素。煤的碳化程度越高,含碳量越大。碳以各种碳氢化合物和碳氧化合物的状态存在,在煤中所占比例最大,收到基成分约为 20%~70% 甚至更多。

纯碳的发热量约为 32 860 kJ/kg。煤的发热量与含碳量的多少有很大关系,通常含碳量愈多,发热量愈高。但碳是不易燃烧的元素,需在高温下才能着火燃烧,在不完全燃烧时生成一氧化碳,可放出 9 270 kJ/kg 的热量。

2) 氢

氢元素在煤中的含量约在 2%~6% 范围内。煤中的氢以两种形式存在:一种是与碳、硫结合在一起的,叫做可燃氢,它可以有效地放出热量;另一种是与氧结合在一起的,叫做化合氢,它不能放出热量。在计算发热量和理论空气需要量时,以可燃氢为准。

氢的发热量很高,完全燃烧时的发热量可达 120 370 kJ/kg,约为碳发热量的 4 倍。此外,氢最易燃烧。

氢存在于挥发性气体中,碳化程度愈深,氢的含量愈少,煤也愈难于着火燃烧,例如无烟煤。另外,含氢量高的煤在贮存时易于风化,含氢量也将随之逐渐减少。



3) 氮和氧

氮和氧都是煤中的不可燃元素。氧是燃料内部杂质,与碳、氢化合,使煤中的可燃碳和可燃氢含量减少,降低了煤的发热量;氮则是有害元素,一般不能参加燃烧,在高温燃烧条件下,煤中所含的氮一部分与氧化合生成 NO_x ,会造成大气污染。

煤中氧的含量随碳化程度加深而减少,煤种不同含量变化很大,少的只有 $1\% \sim 2\%$ (如无烟煤),多的可达 40% 左右(如泥煤)。煤中氮的含量一般都很少,约为 $0.5\% \sim 2.5\%$ 。

4) 硫

硫是燃料中一种极为有害的物质,燃烧后生成 SO_2 和 SO_3 ,危害人体、污染大气并可形成酸雨,在锅炉中会引起锅炉换热面的腐蚀。

硫在煤中有三种存在形式:

① 有机硫,来自母体植物,呈化合态均匀分布。

② 黄铁矿硫,它们是在煤的形成过程中从外部夹杂而来的,以金属硫化物的形式存在(如 FeS_2 , CuS , ZnS 等,其中 FeS_2 最为常见)。

③ 硫酸盐硫,以各种硫酸盐的形式(主要是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 FeSO_4 等形式)存在于灰分中。

有机硫占煤中硫含量的 $1/3 \sim 1/2$ 。含硫量低于 0.5% 的低硫煤中的硫以有机硫为主,黄铁矿硫含量较少,硫酸盐硫含量甚微;而含硫量大于 2% 的高硫煤中主要为黄铁矿硫,少部分为有机硫,硫酸盐硫一般不超过 0.2% 。

有机硫和黄铁矿硫都能参与燃烧反应,总称为可燃硫或挥发硫,而硫酸盐硫则不能进行燃烧反应。硫的发热量为 $9\,210\text{ kJ/kg}$,在计算发热量和理论空气需要量时,以可燃硫为准。

我国动力用煤的含硫量一般在 $1\% \sim 1.5\%$ 之间,少量贫煤、无烟煤、劣质烟煤的含硫量为 $3\% \sim 5\%$ 甚至更高。含硫量高($>2\%$)的煤种,在燃用前或在炉内应采取脱硫措施。

过去,发电厂排气中的硫化物一般并不除去,但从环境保护角度考虑应加除硫装置,这会使发电厂的设备费用增加 20% 左右。

5) 灰分

灰分是指煤中所含矿物质(碳酸盐、粘土矿物质及稀土元素)在燃烧过程中经高温分解和氧化后生成的固体残留物。其主要成分为: SiO_2 , $40\% \sim 60\%$; Al_2O_3 , $15\% \sim 35\%$; Fe_2O_3 , $5\% \sim 25\%$; CaO , $1\% \sim 1.5\%$; MgO , $0.5\% \sim 8\%$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, $1\% \sim 4\%$ 。

煤的灰分在煤的燃烧、加工、利用的全部场所都会带来不利影响。煤的灰分超过 45% 即列入暂不开采对象。灰分每增加 1% ,燃料消耗就增加 1% 。

灰分影响挥发分的析出,其含量愈多则挥发分析出温度愈高,着火速度也就愈慢,且燃烧温度下降,炉内结渣、受热面积灰与磨损都较严重。为了控制排烟中粉尘的排放浓度,保护大气环境,对烟气中的尘粒必须进行除尘处理。

煤中的灰分可分为两种:一种是煤化过程中由土壤等外界带入的矿物质,称为外来灰

分。这种灰分可以用浮选等物理选矿方法来清除。一般工业用的洗净煤的含灰量在 8% 左右。特别仔细的物理洗煤技术可将煤中的灰分洗到 3% 左右,再要降低灰分就需要用化学方法。另一种灰分是成煤植物中固有的,称之为内在灰分。减少内在灰分必须将煤磨细后,用化学液体(如氢氟酸)与灰分作用,然后再用碱液洗掉酸,最后用水洗。这一过程成本昂贵,对环境污染严重。

灰分的含量在各种煤中变化很大,少的只有 4%~5%,多的可达 60%~70%(如石煤和煤矸石)。另外,原煤中的矿物质无论在数量和组成上,都与煤燃烧后剩余的灰渣不同,但其间有一定的关系。

在工业上解决灰分的方法有:

- ① 在入炉前减少煤中灰分,采用洗煤的方法。
- ② 在燃烧过程中排渣(液体排渣)或在燃烧之后的排气中除尘(固体除尘)。排气除尘可以采用除尘器。

6) 水分

水分是燃料中的惰性物质,其含量愈大,煤的可燃质就愈少,发热量愈低。煤中的水分多将使炉内温度降低,延长煤的着火与燃尽时间,影响煤的燃烧稳定性;易在低温处腐蚀设备;会使制粉设备难以工作,需要用高温空气或烟气进行干燥。

煤中的水分包括两部分:

① 外在水分(也叫做湿分或机械附着水),是指煤在开采、运输、贮存和洗选过程中带进的水分,它们不被燃料吸收而是机械地附着在燃料表面上。外在水分易于蒸发,与大气温度有关,变化很大。

② 内在水分,是指达到风干状态后燃料中残留的水分,它包括被燃料吸收并均匀分布在可燃质中的化学吸附水和存在于煤中的矿物质中的矿物结晶水。内在水分不易蒸发,只有在高温(105~110℃)分解时才能除去。通常在做分析计算和评价燃料时所说的水分就是指的这部分水分,工业分析时一般不予测定。

各种煤的含水量差异很大,通常无烟煤中水分多的也只有 2%~9%,而褐煤中的水分可达 40%~50%。

1.1.3 煤的成分表示方法及其换算

1) 煤的成分表示方法

固体燃料的成分通常用各组分的质量分数来表示。

对煤的化学分析分两类:元素分析及工业分析。

(1) 煤的元素分析研究的是煤中所含有机质元素碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)五种元素及灰分(ash)和水分(moisture)在煤中的质量分数。煤的元素分析是煤的固有成分测定,可按如下公式计算:

$$\underbrace{C + H + O + N + S}_{\text{可燃质}} + \underbrace{A + M}_{\text{惰性质}} = 100 \quad (1-1-1)$$



式中, C, H, O, N, S 分别为煤中所含碳、氢、氧、氮、硫的质量分数($\times 100$)^①; A, M 分别为灰分、水分的质量分数($\times 100$)。

元素分析指标的应用很广,在锅炉中,凡涉及燃烧计算和热力计算的项目,均需煤的元素分析指标。煤的元素分析方法比较复杂,一般由煤的研究、管理机构进行。

(2) 另外一种分析煤的方法称为工业分析。这种分析按煤的燃烧过程来分析煤的成分,把经空气干燥的煤样放入马弗炉中加热,水分会先蒸发,然后煤样因温度升高而裂解,放出可燃气,称为挥发分(volatile),其质量分数($\times 100$)以 V 表示;余下的固定碳与灰分(统称焦炭)放入马弗炉中燃烧,最后剩余的不可燃成分是灰分,其质量分数($\times 100$)以 A 表示,固定碳(fixed carbon)的质量分数($\times 100$)以 FC 表示。工业分析的结果由 M, V, A 和 FC 组成,这四项之和应为 100:

$$M + V + A + FC = 100 \quad (1-1-2)$$

煤的工业分析是对煤经转化后的生成物的性质分析,就其性质来说是经验性的,它得出的结果并非元素的质量分数。

煤的工业分析是一种实用性的技术分析,分析实验设备比元素分析简单,不一定需要专门的实验室,可以在煤的使用单位进行。借助其分析结果,可以概括地了解煤中有机质和无机质的含量,并对有机质的特性及其对锅炉燃烧的影响作出基本判断,同时也是发电用煤分类的重要依据。

2) 常用的四种基准

由于煤中的水分与灰分随外界条件的变化而变动,煤中各种成分的质量分数也会随之改变,难以明确地表示它们的含量,因此,需要定出几种基准,用以表示在不同状态下煤中各成分的含量,以便于应用和分类。

(1) 收到基:收到基成分(as received)以进入锅炉房的炉前煤,即实际应用或所收到的煤的总量作为计算基数,用脚码“ar”表示(也称为应用基,用上标“y”表示)。

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100 \quad (1-1-3)$$

在进行燃料的燃烧计算和热力计算时,均采用收到基,原煤的水分也以收到基含量表示。

(2) 空干基:空干基成分(air dry)以在实验室经过自然干燥,去掉外在水分的煤的总量作为计算基数,用脚码“ad”来表示(也称为分析基,用上标“f”表示)。煤在实验室中放置时,在室温 $> 20^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 60% 的一般正常条件下会失去外在水分,留下一定的稳定内在水分,称之为空气干燥水分。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100 \quad (1-1-4)$$

空干基常在实验室内作煤样分析时采用。用空气干燥试样进行分析实验可消除实验中水分变化的问题。

① 由于行业惯例,本书在计算公式中使用的表示物质组成的量均采用质量分数(或体积分数)乘以 100 之后的数值,而在叙述性或说明性文字中,表示物质组成的量仍然直接采用质量分数(或体积分数)的数值。

(3) 干燥基:干燥基成分(dry)以去掉全部水分的煤的总量作为计算基数,用脚码“d”表示(也可用上标“g”表示)。煤在运输、贮存和燃烧前干燥时其水分会发生变化,而可燃质和灰分成分都不变。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100 \quad (1-1-5)$$

干燥基成分不受水分变化的影响,常用以表示灰分的含量。

(4) 干燥无灰基:干燥无灰基成分(dry and ash. free)以将水分与灰分两种含量不稳定的成分去掉后剩余的煤的总量作为计算基数,用脚码“daf”表示(也称为可燃基,用上标“r”表示)。

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100 \quad (1-1-6)$$

干燥无灰基组成不受水分、灰分变化的影响,可以比较准确地表示出燃料的实质。同一煤矿、同一煤层所采煤的可燃质成分变化很小,而灰分、水分的变化则很大。

干燥无灰基常用来表示煤中挥发分的含量,而挥发分含量又常常用以判别煤种及其属性。

同样,煤的工业分析成分也有收到基、空干基、干燥基、干燥无灰基等基准,可以分别用下列诸式表示:

$$FC_{ar} + V_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100 \quad (1-1-7)$$

$$FC_{ad} + V_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100 \quad (1-1-8)$$

$$FC_d + V_d + A_d = 100 \quad (1-1-9)$$

$$FC_{daf} + V_{daf} = 100 \quad (1-1-10)$$

3) 各种基准的换算

实验室中实际分析工作所得到的是空干基成分,然后再根据水分含量等不同而换算成其他基的成分。表 1-1-1 为各种基准成分之间的换算因子。

表 1-1-1 煤的不同基准成分的换算因子

已知成分	脚 码	所求成分			
		收到基	空干基	干燥基	干燥无灰基
收到基	ar	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空干基	ad	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	d	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	daf	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

图 1-1-1 所示为各种基准成分之间的关系及其与元素分析之间的关系,其中 S_p 为不燃的硫酸盐硫, S_b 为可燃硫, M_i 为内在水分, M_s 为外在水分。

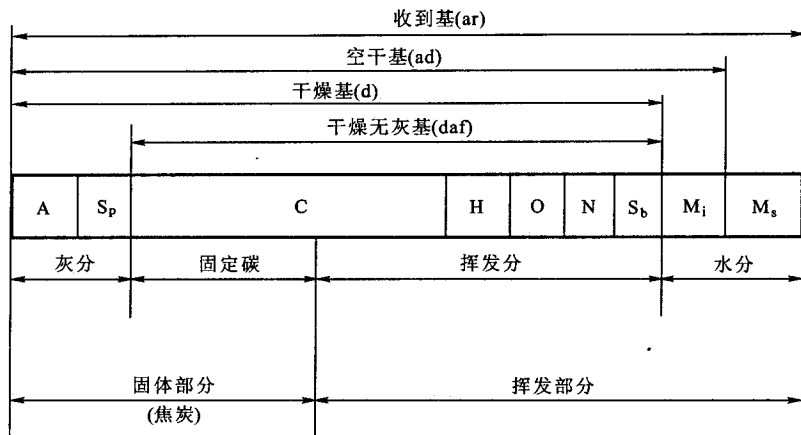


图 1-1-1 各种基准成分之间的关系及元素分析之间的关系

4) 煤的折算水分和折算灰分

从广义上说,某一种煤的水分或灰分数值并不能完全说明这种煤的品质,采用折算灰分更为合理。折算水分和折算灰分是指每 4 180 kJ 热量(定压低位发热量)收到基燃料所具有的水分和灰分。

折算水分 M_{ZS} :

$$M_{ZS} = 4\,180 \frac{M_{ar}}{Q_{ar, net, p}} \quad (1-1-11)$$

折算灰分 A_{ZS} :

$$A_{ZS} = 4\,180 \frac{A_{ar}}{Q_{ar, net, p}} \quad (1-1-12)$$

1.1.4 煤的使用性质

为了合理使用煤、选择恰当的燃烧装置及制订燃烧操作规程,除了煤的化学组成外,必须了解煤的使用特性。煤在燃烧设备中燃烧的特性可以根据其元素分析、工业分析结果及其他有关数据来判断。煤的元素分析并不能反映煤在燃烧时的某些性质,而通过煤的工业分析则可以较好地了解煤的使用特性。

煤的工业分析是在规定条件下将煤样进行加热和干燥,测出煤中水分、灰分、挥发分和固定碳四种成分所占的质量分数,此外还包括煤的发热量、灰熔点的测定和剩余焦炭特征的鉴定。

1) 煤的工业分析

煤的工业分析可在煤的使用单位进行。为了统一煤的工业分析实验方法,我国颁布了国家标准 GB/T 212—2001《煤的工业分析方法》,在实验时必须按其规定的方法进行。

(1) 水分的测定。

① 外在水分的测定:取 200 g(精确至 0.1 g)试样放入 45~50 °C 烘箱内干燥 8 h,取