

高等学校试用教材

锻造加热设备

合肥工业大学 曹诗倬 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

31
32

本书系统介绍了锻造生产用的火焰炉和电加热装置的工作原理、结构特点,并介绍一些常用的锻造加热设备的基本结构、新技术和发展趋势。全书共分六章:前三章介绍了火焰炉热工过程基本理论;第四章介绍火焰炉的结构特点及工作性能;第五章简要地论述电加热的原理、装置的结构和工作特点;在第六章中,对于锻造加热中节约能源和防治污染两个问题进行了分析和讨论。书中在介绍加热过程分析计算的相应章节中配置有一些例题和习题。

本书主要供高等学校锻压专业师生使用,也可供有关科技人员参考。

锻造加热设备

合肥工业大学 曹诗倬 主编

*

责任编辑:杨 燕

版式设计:张伟行

责任校对:李广孚

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10\frac{1}{2}$ · 字数 251 千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800 · 定价:1.80元

*

ISBN 7-111-00134-6/TG·45 (课)

前 言

本书是根据1983年11月全国高等工业学校锻压专业教材分编审委员会第二次扩大会议审议通过的教学大纲和编写大纲编写的,本书是高等学校锻压专业用教材,也可供从事锻造加热技术的工作人员参考。

全书共六章,前四章介绍锻造生产中常用的火焰炉的热工过程理论及其结构特点和工作性能;第五章阐述电加热工作原理、加热装置的基本结构及使用特点;最后一章简要地讨论锻造加热中的节能和环境保护两个专题。编写中力求讲清基本原理和典型加热炉的基本构造、工作特性,在内容选取上注意结合生产实际并反映国内外新技术新成果和发展趋势。

本书第三章和第四章中的第七节由华中工学院徐龙啸编写,第六章由华中工学院黄遵循编写,其余章节由合肥工业大学曹诗倬编写,全书由曹诗倬担任主编。由清华大学杨津光担任主审。

在编写过程中还参考了机械委第五设计院工业炉研究室、南昌航空学院、哈尔滨工业大学、华中工学院和合肥工业大学等编印的锻造加热设备的教材或讲义。程秉恒、吴德荣、张子公、杨振恒等同志热情关心本书的编写工作,提供了很多宝贵资料和指导,谨在此致以谢忱。

对本书中的错误、疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

绪论	1	一、流股的概念	37
一、金属加热在锻造生产中的作用及对加 热质量的评判	1	二、影响气流混合的因素	39
二、锻造加热设备的分类及基本组成	1	三、炉气在炉膛中的合理流动	40
三、锻造生产对加热设备的要求	2	四、炉内气体压力的分布与调节	41
四、锻造加热技术概况	3	§ 2-5 烟囱的工作原理与计算	42
五、本课程的任务、学习要求及 基本内容	4	一、烟囱的工作原理	43
第一章 燃料及其燃烧计算	5	二、确定烟囱的主要参数	44
§ 1-1 燃料的化学组成	5	§ 2-6 风机的选择	48
一、固体燃料和液体燃料的组成及其 表示法	5	一、加热炉上配用的风机	48
二、气体燃料的组成及其表示法	7	二、通风机的选用	49
§ 1-2 燃料的发热量	8	习题	50
§ 1-3 燃料燃烧过程的分析计算	10	第三章 炉内传热	51
一、空气需要量与燃烧产物量	10	§ 3-1 传热的基本方式	51
二、燃烧产物的成分	12	一、稳定导热	51
三、燃烧产物的密度	13	二、对流换热	53
四、燃烧温度	13	三、辐射传热	55
§ 1-4 燃料燃烧过程的概略计算	16	§ 3-2 炉内综合传热	57
一、空气需要量和燃烧产物量	17	一、对流与辐射同时存在时的综合传热	58
二、理论燃烧温度	17	二、炉墙散热	58
§ 1-5 炉用燃料	21	三、炉膛内热交换的计算	59
一、各种燃料	21	§ 3-3 坯料加热时间的计算	63
二、燃料的合理选用	24	一、薄料与厚料的概念	63
习题	25	二、薄料加热时间的计算	64
第二章 炉内气体流动	26	三、厚料加热时间的计算	66
§ 2-1 静止气体的能量和压头	26	习题	74
一、气体静力学基本方程式	26	第四章 火焰炉	75
二、压头的概念	28	§ 4-1 火焰炉的基本类型	75
§ 2-2 伯努利方程式	30	§ 4-2 炉膛尺寸的确定	76
一、伯努利方程式	30	一、炉底面积 F_d	76
二、伯努利方程式的应用	31	二、炉膛高度 H	77
§ 2-3 气体流动中的压头损失	33	§ 4-3 砌体结构及筑炉材料的选择	78
一、摩擦阻力损失 $h_{m, \text{管}}$	33	一、常用筑炉材料	78
二、局部阻力损失 $h_{m, \text{局}}$	34	二、耐火材料的工作性质和常用耐火砖	79
§ 2-4 炉膛内气体流动	36	三、炉体的砌筑	80
		§ 4-4 预热器	83
		§ 4-5 燃煤炉	87
		一、块煤的燃烧过程及其特点	87

二、手工加煤反射炉.....	89	§ 5-2 接触电加热.....	130
三、机械化加煤的加热炉.....	93	一、接触电加热的工作原理	130
四、煤气化加热炉.....	97	二、接触电加热的应用	131
五、煤粉炉.....	99	三、接触电加热的计算	132
§ 4-6 燃气炉和燃油炉.....	100	§ 5-3 感应加热.....	133
一、煤气的燃烧过程及其特点	100	一、感应加热的基本原理	133
二、煤气燃烧装置——烧嘴	102	二、中频感应加热装置及其组成	136
三、重油燃烧过程及其特点	105	三、感应加热电力系统的计算	140
四、重油燃烧装置——喷嘴	107	四、例题——圆柱形感应器的计算	142
五、燃油炉和燃气炉	110	习题	146
§ 4-7 少氧化加热炉.....	113	第六章 锻造加热中的节能和环境保护	
一、概述	113	问题	147
二、敞焰少氧化加热的原理	114	§ 6-1 锻造加热中的热能利用情况.....	147
三、燃料的不完全燃烧计算	116	一、热平衡计算	147
四、敞焰少氧化加热炉的结构简介	118	二、热平衡计算实例及热能利用分析	151
§ 4-8 火焰炉主要技术经济指标及炉型选 择.....	121	§ 6-2 锻造加热中节能的意义及主要途 径.....	151
一、火焰炉主要技术经济指标	121	一、节能的意义及政策	151
二、炉型选择	123	二、锻造加热中节能的主要途径	151
习题	125	§ 6-3 锻造加热中的污染及其防治.....	157
第五章 电加热	126	一、烟尘	157
§ 5-1 间接电阻加热装置——电阻炉.....	126	二、有害气体	158
一、电热元件	126	三、噪声	159
二、电阻炉	127	主要参考文献	160
三、电阻炉的选用	128	附录	161

绪 论

一、金属加热在锻造生产中的作用及对加热质量的评判

几乎各种锻压工艺都是使金属在外力作用下产生塑性变形，按照一定的要求制成所需形状的零件或半成品。为了使金属在成形过程中不发生破坏，并尽量减小变形能，总是希望它具有很好的塑性和很低的变形抗力。

众所周知：金属在升温过程中，除了几个狭窄的脆性区外，其它区域塑性是不断增加，变形抗力也是不断降低的。对于锻造、热挤等热变形工艺，须将金属加热到一定的温度范围，使它有尽可能高的塑性和尽可能低的变形抗力，即具有最好的可锻性。而对于温锻、温挤等温变形工艺，也须将金属加热以获得良好的可锻性，不过为了使金属不产生剧烈的氧化从而保证变形后有较高的尺寸精度和表面质量，其变形温度要控制在较低的范围内。

为了消除金属在成形时产生的内部组织不均、残余应力和加工硬化等不良现象，金属在成形后或成形中间阶段要进行热处理。在此情况下，金属加热也是必需的重要工序。

随着锻造技术的发展，对加热质量提出更高的要求。例如精锻要求在加热时坯料不发生或极少发生氧化和脱碳，所以必须采取少无氧化加热；再如，对某些低塑性材料进行塑性成形时，加工温度范围很窄，温度均匀性要求高，即金属各部位之间、表面和中心之间的温度差限制在很小的范围内。因此，金属加热是一项技术性很强的工作。

金属加热速度必须和锻造设备生产率相适应。随着锻造生产的深入发展，锻造设备不断高速化，为了尽量不增加加热设备的数量和炉底面积，就要不断提高金属加热速度。另外，为了实现锻造生产过程自动化，在自动线上，金属加热的速度必须和锻造设备行程节拍严格协调。金属加热在锻造生产中虽属“配角”，但是如果“配”得不好，必然降低整个机组的生产率，对锻造生产起阻碍作用。

金属加热除了具有上述重要作用外，结构合理的加热设备和正确的加热工艺对节约能源、降低生产成本、保护环境和改善劳动条件都具有重要意义。

金属加热的好坏对锻造生产影响很大，金属加热的质量应从以下几方面评判：

(1) 加热温度。对于锻造生产，就是要将金属加热到规定的始锻温度。

(2) 加热的均匀性。如果金属内部温度分布不均，必然会产生温度应力，当金属内部综合应力过大时，会在断面上产生裂纹。这一点对于加热低塑性材料和断面尺寸很大的材料应特别予以重视。

(3) 加热速度。提高加热速度就是提高生产率，并且有利于减少金属的氧化和脱碳。

(4) 加热缺陷。要求金属加热后不产生裂纹和过烧、过热，对于氧化和脱碳也应根据不同工艺要求提出相应的限制。

二、锻造加热设备的分类及基本组成

利用燃料的热能或由电能转化的热能来加热金属的装置总称为加热设备，或称为加热炉。为了适应锻造生产的要求，需要有相应的加热设备来保证加热质量和生产率。随着锻造

生产的不断发展,出现了多种多样的加热设备。根据加热时所采用的不同能源,可将加热设备分为两类:火焰加热炉和电加热装置。

火焰加热炉是利用固体、液体和气体燃料燃烧所放出的热量加热金属的各种煤炉、油炉和煤气炉等。因为它们能适合加热不同尺寸、重量和形状的坯料,所以得到了广泛应用。

图0-1是燃煤火焰反射炉的示意图。该炉工作过程如下:将煤从加煤口送入燃烧室,并被支承在炉篦上,自炉篦下方鼓入空气,使煤层燃烧。从煤层逸出的高温炉气经炉口流入炉膛,向金属坯料传热,废气则经烟道流入烟囱排到大气中去。因为废气的温度很高,所以应在烟道内放预热器,用以预热助燃的空气,回收部分热量。金属坯料在炉膛内被加热到始锻温度后,可从炉门口取出供锻造成形。由图0-1可见,炉子基本上由下述几部分构成:

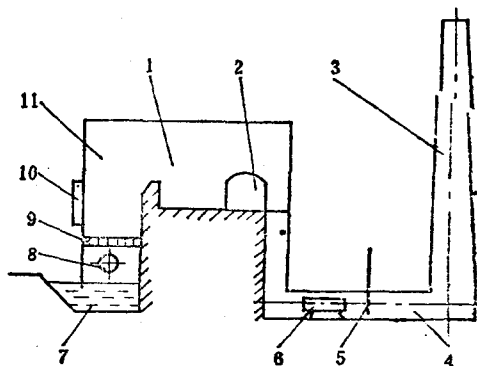


图0-1 燃煤反射炉

1—炉膛 2—炉口 3—烟囱 4—烟道 5—烟罩
6—预热器 7—水封渣坑 8—进风管 9—炉篦
10—加煤口 11—燃烧室

(1) 炉膛(加热室,或称工作室)。这是加热金属坯料的空间,由炉底、炉顶和四周炉墙围成。

(2) 燃烧装置。它用于组织燃烧过程,产生炉子所需的热能。煤炉、油炉和煤气炉的燃烧装置分别称为燃烧室、喷嘴及烧嘴。

(3) 排烟系统。它包括烟道、烟道闸门和烟囱。其作用是排除废气和控制炉内气体压力。

(4) 辅助装置。它包括回收废热的预热器、封盖加煤口和炉口的炉门、加固炉体的钢架和鼓风管道等。

加热炉内所完成的一切过程(燃料燃烧、炉气运动、热交换等)的总和称为炉子热工作。研究炉子热工作的理论称为炉子热工理论。

用火焰炉加热金属要消耗大量燃料,热能利用率也很低。例如煤炉的热效率一般都不足10%,而且金属氧化严重(一次加热金属氧化烧损量高达2%左右)。要克服这些缺点,一方面是继续改进火焰炉,另一方面就是采用电加热。用于锻造生产的电加热装置有电阻加热炉(电阻炉、接触电加热装置)、感应炉和盐浴炉等。电加热的生产率高,加热速度快且便于控制,烧损量也大大减少。虽然我国目前发电量还不多,用电不如用燃料经济,电加热的锻件质量只占总锻件量的5%,但是随着我国电力事业的发展,电加热的比重将不断增加。

三、锻造生产对加热设备的要求

加热设备应该适应锻造生产的发展,多快好省地满足生产的需要。锻造生产对加热设备有如下基本要求:

(1) 加热质量高。这是保证锻造产品质量的重要前提条件。加热坯料的温度必须达到规定的锻造温度,内部温度要均匀,要尽量减少表面氧化、脱碳和过热,不允许产生过烧、开裂等现象。

(2) 生产能力大。要求炉子有较高的生产率。表示加热炉生产率的指标为炉底强度(它是指单位时间内 1m^2 炉底面积上加热好的金属质量)。

(3) 燃料消耗少。表示炉子燃料消耗的指标主要是单位燃料消耗量(它是指将单位质量的金属加热到锻造温度时,平均所消耗的燃料质量)。

(4) 劳动条件好。尽量减轻炉前辐射和喷火冒烟现象,提高炉子机械化水平,减少繁重的体力劳动量。

(5) 建筑费用和维修费用要低。

(6) 炉子寿命要长。

以上要求是全面衡量现有加热炉是否先进的几个重要指标,也是改造加热炉的主要方向。

四、锻造加热技术概况

解放以来,我国锻造加热技术在各个方面都获得了一定的进展,主要表现在:

(1) 锻造加热的能源结构经不断调整,正朝着有利于现代化加热技术方向发展。原来的地炉已经绝迹,明火炉基本淘汰,直接烧煤的炉子所占比例也不断减小,比较先进的煤气炉、油炉和电炉的比重则不断增加。

(2) 随着烧油和烧煤气加热炉的发展,研制和应用了一些新型高效的燃烧装置。

(3) 在改造燃煤锻造炉方面取得许多成绩。

(4) 少无氧化加热技术取得了一定成果,对于快速加热、温锻加热等新工艺也进行了一些试验和研究。

(5) 采用了新的筑炉材料。例如开始应用了耐火纤维、可塑料、浇注料和涂料等。

近十几年来,国外锻造加热技术的发展是非常迅速的,在加热工艺、加热设备等各方面,以实现高效、节能、自动化和防止公害为目的,作了大量的研究和试验,获得了显著的成就。

几乎所有的工业发达国家,在锻造加热上都不再使用直接烧煤的炉子。日本专业锻造厂1979年电加热比重已占35%,苏联用电炉加热的锻件已从1965年的6%增加到1980年的20%。

快速加热的加热速度接近感应加热,往往能使炉子热效率提高20%左右,目前,这种快速加热方法已经从研究阶段进入到工业应用阶段。对大型锻件的加热,也从改进加热制度着手,实现了快速加热。例如,苏联大锻件的加热时间平均缩短了30%以上。此外各种少无切屑塑性成形工艺的发展促使许多国家重视发展少无氧化加热和温锻加热。

节约能源问题一直是锻造加热技术中的中心课题,现在普遍重视减少热损失和回收废热以提高炉子热效率。采用轻质炉衬,尤其是耐火纤维炉衬和轻质多层复合炉衬,大幅度地减少炉墙散热损失和蓄热损失。间歇生产的锻造炉采用复合炉衬可比砌砖炉衬减少散热和蓄热损失90%。还有,通过控制炉压、富氧鼓风、用节能涂料等措施,也取得显著的节能效果。为了大量回收排烟的余热,已研制出许多高效长寿的预热器。现在有一种新的陶瓷换热器,可将空气预热到430~630℃,燃料节约率可达26~50%,换热器费用12个月即可收回。日、美、苏、英等国锻造加热炉的单位燃料消耗量都较低,约为0.3kg标燃/kg。有的炉子热效率高达40%。

为适应各种加热工艺的要求,许多新的燃烧器陆续问世,如平焰烧嘴、快速烧嘴、热风比例调节烧嘴、自身预热烧嘴等,都有很好的强化加热和节能的效果。目前推广的自身预热烧嘴可以将空气预热到300~600℃,节约燃料15~30%。还有适用于无氧化加热的环流烧嘴、减少污染的低NO_x烧嘴、燃烧多种燃料的烧嘴等。

国外一些大型锻造炉已实现计算机综合控制,包括燃料流量和空气流量的控制、空燃比的控制、炉内压力和温度的控制。例如在日本铸锻公司的大型水压车间里,80000kN水压机和2400kN操作机联机操作与炉温控制全部采用微型机数控,炉温可在600~1300℃范围内选取,炉温波动控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$,提高了加热质量。

因为炉子经济效益与生产管理关系极大,所以国外普遍重视生产管理。美国、日本都重视健全炉子的检测装置,认真进行炉子热平衡计算,对于加热技术及加热设备有一整套技术标准和定额,在培训工人、维修炉子和生产调度等方面也都有相应的制度。

许多国家对加热技术的研究工作都给予足够的关注,一些大的工业公司都建立相应的研究机构。还有不少专门生产炉子、燃烧器和预热器的工厂,在竞争中不断研制新产品投放市场。

从目前情况来看,我国锻造加热的现状是落后的,和国外先进水平差距很大,如没有严格的加热工艺,炉型陈旧,管理水平差,能源消耗量大等。近几年来,我国有关部门重视发展加热技术,注意研究工作,并陆续研制出平焰烧嘴、自身预热烧嘴,建成了有一定特点的少无氧化加热炉,继续对煤炉进行改造、对炉子进行必要的检测,开始生产一些新型筑炉材料等。此外,在企业改造过程中逐步实现专业化生产、生产中实行岗位责任制等等。所有这些,都对提高我国锻造加热技术水平起到了积极作用。但是,目前锻造加热还未受到普遍重视,进展速度很慢。要想改变落后状态,赶超世界先进水平,还要做许多艰巨的工作。

五、本课程的任务、学习要求及基本内容

本课程是锻压专业的一门专业课。它的任务是使学生具备正确选用、使用和改造锻造加热设备的能力。为此,学习本课程应达到如下要求:

- (1) 掌握加热设备的工作原理;
- (2) 初步掌握炉内热工过程的分析计算方法;
- (3) 初步掌握常用锻造加热设备的结构特点和工作性能。了解改善加热设备工作性能的途径;
- (4) 了解国家的能源政策。

我国锻造行业所采用的加热设备基本上是火焰炉,因此本课程内容主要是火焰炉的工作原理和基本构造。介绍炉子工作原理时,主要是围绕炉子热工过程阐述燃料燃烧、炉气流动和热交换等方面的基本理论,即本课程的前三章内容。第四章介绍常用的火焰加热炉的基本构造和工作性能。考虑到电加热是先进的加热方法,随着生产的发展,它将得到广泛的应用。因此,本课程将电加热专列一章,主要介绍感应加热和接触加热的工作原理和特点。节约能源是实现四化的一项战略措施,为适应节能工作的需要,第六章分析了锻造加热中节约能源的潜力和主要途径。此外,该章还对环境保护问题作了概略的介绍。

由于在学习本课程之前,同学们已经学过液压传动、热工基础、电工学和锻造工艺学等课程,因此牵涉到以上课程中的有关内容,在本课程内尽量不作重复。因本课程主要介绍锻造加热设备的工作原理和结构特点,故对于各种加热炉的具体构造及其有关参数,可查阅有关手册及图册。

第一章 燃料及其燃烧计算

锻造加热所采用的热源主要是各种燃料。按燃料的物态和来源将其分类如表 1-1。

表1-1 燃料的一般分类

物 态	来 源	
	天 然 燃 料	加 工 燃 料
固体燃料	木柴、煤、天然页岩等	木炭、焦炭、煤粉等
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、焦油、酒精等
气体燃料	天然气	高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气等

燃料和一定量空气（氧气）混合，达到着火点即开始燃烧，放出热量。高温的燃烧产物作为载热体将热量带入炉膛，用来加热金属。因此，了解燃料的质量、计算燃烧反应中的一些参数，对于锻造加热有着重要意义。

评价燃料的质量，必须分析燃料的性质。燃料的性质包括许多方面，由于我们只是利用燃料的燃烧热来加热金属，所以只从燃烧的角度，介绍燃料的化学组成和发热量。

§ 1-1 燃料的化学组成

一、固体燃料和液体燃料的组成及其表示法

1. 燃料的成分及其作用

自然界中的固体和液体燃料的基本组成物，是呈多种化合物形式存在的有机物质。构成它们的元素成分有碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）等。此外还有部分杂质，如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等，统称为灰分（A）。燃料中还或多或少地含有一些水分（W）。

燃料中各种成分的作用：

（1）C 和 H：C 和 H 在燃烧过程中能放出大量的热，是有用的可燃成分。燃烧 1kg H 放出的热量几乎等于燃烧 3.5kg C 放出的热量。H 在固体燃料中含量较少，意义不大。在液体燃料中 H 约占 10% 左右，因而对液体燃料总的放热能力有很大影响。

（2）S：S 也可以燃烧，但放热量较小，特别是它燃烧后所生成的 SO_2 是有害气体，所以燃料中的含硫量要求越少越好，一般应小于 0.5%。

（3）N：N 不参加燃烧反应，是燃料中的惰性物质。它在升温时要吸热，而且它的存在降低了燃料中可燃物的相对含量。在固体燃料中它的含量很少，危害性不大。

（4）W：W 也具有与 N 相同的不良作用，但烧煤时少掺一些水可以减少煤粒和灰粒的吹出量，油中掺水制成乳化液，可使油燃烧得更加完善。

（5）O：O 除了具有与 N 相同的不良作用外，它在燃料中还和一部分可燃成分结合在一起，使这些可燃物也丧失了燃烧放热能力。

(6) A: A对固体燃料有很大影响,它不仅在升温时吸热,降低燃料中可燃物的相对含量,而且燃烧后还会生成大量灰渣,增加了清理炉子的劳动量,况且,灰渣出炉还带走了许多热量和一些未燃尽的煤粒。灰分是多种无机物的混合物,没有固定的熔点,一般以它的软化温度作为熔点。根据熔点高低将灰分分为三种:

易熔灰分,软化温度 $<1200^{\circ}\text{C}$;

可熔灰分,软化温度为 $1200\sim 1350^{\circ}\text{C}$;

难熔灰分,软化温度 $>1350^{\circ}\text{C}$ 。

当燃烧低熔点灰分的煤时,灰渣熔融结块,影响通风,不便清理,其危害性更为严重。简易煤气加热炉(背包炉)若使用这样的煤,就难以正常燃烧。

综上所述,在燃料中只有C、H是有益成分,其余都是有害成分,它们的含量愈少,燃料的质量愈好。

2. 燃料成分的表示法

各成分在燃料中的含量用它的质量分数表示。这些质量分数是通过元素分析法确定的,它不能表示出燃料是由什么化合物所组成,也不能用来判定燃料的某些性质,但是,它可以用来近似地评价燃料的价值,特别是在进行燃烧分析计算时,元素分析的结果是必不可缺的依据。

为了便于分析和说明燃料的某些性质,燃料的成分可按四种不同基数的计算值来表示。各种基数的包含量见表1-2。

应用基成分是以燃料在应用条件下的实际化学组成为计算基数所表示的各成分的质量分数。应用基为:

$$w_{\text{C}}^{\text{a}} + w_{\text{H}}^{\text{a}} + w_{\text{O}}^{\text{a}} + w_{\text{N}}^{\text{a}} + w_{\text{S}}^{\text{a}} + w_{\text{A}}^{\text{a}} + w_{\text{W}}^{\text{a}} = 100\%$$

式中 w_{C}^{a} 、 w_{H}^{a} 、...分别代表C、H、...应用基成分的质量分数。

因为燃料中的水分受季节、运输及存放条件的影响而发生变化,为正确比较出燃料的质量,所以常采用不计水分的干燥基成分表示各燃料成分含量。干燥基为:

$$w_{\text{C}}^{\text{d}} + w_{\text{H}}^{\text{d}} + w_{\text{O}}^{\text{d}} + w_{\text{N}}^{\text{d}} + w_{\text{S}}^{\text{d}} + w_{\text{A}}^{\text{d}} = 100\%$$

式中 w_{C}^{d} 、 w_{H}^{d} 、...分别代表C、H、...干燥基成分的质量分数。

固体燃料中的灰分也受外界条件的影响,因此不计灰分和水分的可燃基成分能更确切地反映燃料的化学组成。可燃基为:

$$w_{\text{C}}^{\text{k}} + w_{\text{H}}^{\text{k}} + w_{\text{O}}^{\text{k}} + w_{\text{N}}^{\text{k}} + w_{\text{S}}^{\text{k}} = 100\%$$

式中 w_{C}^{k} 、 w_{H}^{k} 、...分别代表C、H、...可燃基成分的质量分数。

有机基各组成是构成燃料中有机物质的基本元素,它可以明确地反映燃料的化学本质,一般是在说明燃料化工特性时才用有机基成分来表示。

不同计算基数的组成是可以互相换算的。为了进行燃烧计算,须将其它基成分换算成应用基成分。

〔例题〕已知 $w_{\text{C}}^{\text{d}} = 80\%$ 、 $w_{\text{W}}^{\text{a}} = 10\%$,试将 w_{C}^{d} 换算成 w_{C}^{a} 。

解:对于某一具体的燃料,若应用基总量为100,则干燥基总量应为: $100 - w_{\text{W}}^{\text{a}}$ (按习惯,各成分代入计算式中都舍去百分号,相当于100kg基数中所含该成分的质量)。不论用何种基

表1-2 固、液燃料的
计算基数

C	H	O	N	S	A	W
有机基						
可燃基						
干燥基						
应用基						

数表示，C的绝对量都是不变的，于是：

$$w_C^y \times 100 = w_C^g (100 - w_W^y)$$

$$w_C^g = w_C^y (100 - w_W^y) / 100 = (80 \times 90) / 100 = 72$$

式中 $(100 - w_W^y) / 100$ 称为干燥基成分换算成应用基成分的换算系数。不同基数的成分之间互相换算的换算系数见表 1-3。

表1-3 固、液燃料不同基数成分间的换算系数

已 知 成 分	要 换 算 的 成 分		
	可 燃 基 成 分	干 燥 基 成 分	应 用 基 成 分
可燃基成分	1	$\frac{100 - w_A^g}{100}$	$\frac{100 - (w_A^y - w_W^y)}{100}$
干燥基成分	$\frac{100}{100 - w_A^g}$	1	$\frac{100 - w_W^y}{100}$
应用基成分	$\frac{100}{100 - (w_A^y - w_W^y)}$	$\frac{100}{100 - w_W^y}$	1

确定以上各成分所用的元素分析法因需要较长的分析时间而不便应用。在工业上，常采用简单的工业分析法，确定出固体和液体燃料中水分、灰分、挥发分（V）和固定碳（C）的质量分数。例如，对煤作工业分析。可将一定量的煤加热至 100°C ，使水分蒸发而测出水分含量。再将燃料隔绝空气加热至 900°C ，维持 7min，逸出的气态物质即挥发分的含量。再通入空气使剩余的碳全部燃尽，称出灰分含量。用总量减去水分、挥发分和灰分量，即可算出固定碳的含量。工业分析的结果可以反映燃料某些使用性质。

二、气体燃料的组成及其表示法

气体燃料是由一些简单化合物组成的机械混合物。这些化合物的含量可以用吸收法分析出来。因此，气体燃料的组成就可从这些化合物来表示。

可燃的组成物有 CO 、 H_2 、 H_2S 、 CH_4 和 C_mH_n 等，其中，碳氢化合物 C_mH_n 燃烧放热最多， H_2 和 CO 次之， H_2S 虽然也可燃烧放热，但它在燃烧后生成的 SO_2 是有害气体，所以希望 H_2S 含量尽量减少。不可燃的组成物有 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 、 SO_2 等。在燃料成分中，总是希望不可燃组成物的含量尽可能少。而可燃成分愈多愈好。

气体燃料中各组成物的含量用体积分数表示，其中包括干成分和湿成分两种表示方法。

例如，对煤气成分进行分析。一般是先将煤气中的水分吸收掉，然后再进行成分分析，这样，得到的分析结果即为干成分，即：

$$\varphi_{\text{CO}}^g + \varphi_{\text{H}_2}^g + \varphi_{\text{CO}_2}^g + \varphi_{\text{N}_2}^g + \cdots = 100\%$$

式中 φ_{CO}^g 、 $\varphi_{\text{H}_2}^g$ 、 $\cdots$ 分别代表 CO 、 H_2 干成分的体积分数。

实际用来燃烧的煤气总是含有一定水分，若煤气成分的总量中计入这部分水蒸气的体积分数，则煤气的各成分为湿成分，即：

$$\varphi_{\text{CO}}^w + \varphi_{\text{H}_2}^w + \varphi_{\text{CO}_2}^w + \varphi_{\text{N}_2}^w + \cdots + \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^w = 100\%$$

式中 φ_{CO}^w 、 $\varphi_{\text{H}_2}^w$ 、 $\cdots$ 分别代表 CO 、 H_2 、 $\cdots$ 湿成分的体积分数。

进行燃烧计算时，必须先将干成分换算成湿成分，换算系数为 $(100 - \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^w) / 100$ 。以 CO 为

例，则有：

$$\varphi_{CO}^* = \varphi_{CO}^s (100 - \varphi_{H_2O}^s) / 100$$

煤气中的水蒸气含量受大气的温度、湿度的影响，一般认为它等于所处温度下的饱和水蒸气量（见表1-4）。有些手册里，给出的饱和蒸气量是以 1m^3 干煤气中所含的水蒸气的质量 $m_{H_2O}^s$ 来表示的，可用下式将它换算成 $\varphi_{H_2O}^s$ 。

$$\varphi_{H_2O}^s = \frac{100m_{H_2O}^s}{803.6 + m_{H_2O}^s} \quad (1-1)$$

表1-4 饱和状态下空气的含水量（压强为 101325Pa）

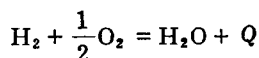
温 度 ℃	蒸气分压 Pa	1 m ³ ①空气含水量			
		质 量/g		体积分数×100	
		干 空 气	湿 空 气	干 空 气	湿 空 气
-20	103.7	0.81	0.80	0.102	0.101
-15	166.3	1.32	1.31	0.164	0.163
-10	261.4	2.07	2.05	0.257	0.256
-8	311.7	2.46	2.45	0.306	0.305
-6	379.8	2.85	2.84	0.364	0.363
-4	440.0	3.48	3.46	0.432	0.430
-2	521.0	3.79	3.77	0.471	0.469
0	610.5	4.87	4.84	0.605	0.602
2	705.8	5.64	5.60	0.701	0.697
4	813.4	6.51	6.46	0.810	0.804
6	935.0	7.48	7.42	0.930	0.922
8	1072.6	8.59	8.52	1.070	1.060
10	1227.8	9.81	9.73	1.220	1.219
12	1402.5	11.2	11.1	1.40	1.38
14	1598.5	12.9	12.7	1.60	1.58
16	1817.2	14.6	14.4	1.82	1.79
18	2063.8	16.7	16.4	2.08	2.04
20	2338.5	19.0	18.5	2.36	2.30
22	2643.8	21.5	21.0	2.63	2.61
24	2983.7	24.4	23.6	3.01	2.94
26	3361.0	27.6	26.7	3.43	3.32
28	3779.7	31.2	30.0	3.88	3.73
30	4242.3	35.1	33.7	4.37	4.19
32	4754.3	39.6	37.7	4.93	4.69
34	5319.5	44.5	42.2	5.54	5.25
36	5940.8	50.1	47.1	6.23	5.86
38	6624.8	55.3	52.7	7.00	6.55
40	7375.4	63.1	58.5	7.85	7.27

① 在未注明状态条件时，均指标准状态下体积，后同。

§1-2 燃料的发热量

燃料的燃烧发热能力是衡量燃料价值的重要指标，其大小用发热量（值）表示。

单位燃料完全燃烧时放出的热量称为燃料的发热量。固体和液体燃料发热量的单位是 kJ/kg ，而气体燃料发热量的单位是 kJ/m^3 。燃料发热量主要取决于它的内部组成，此外，还同燃烧产物的状态和温度有关，例如



如果生成物是水蒸气，则说明它已经以汽化热的形式消耗了部分放出的热量，放热量就比生成物凝成水的情况要少；如果生成物都凝成水，那么生成温度高的水的情况比生成温度低的水的情况放热少，因为前者要从放出的热量中多吸去一部分热来提高自己的温度。所以，要明确表示发热量的数值，必须对燃烧产物的状态和温度加以规定。发热量有两种：

(1) 高发热量 Q_g 。当燃烧产物中的水蒸气凝成 0°C 的水，而其它燃烧产物的温度冷却到反应物的初始温度时，单位燃料完全燃烧所放出的热量即高发热量。

(2) 低发热量 Q_d 。当燃烧产物中的水蒸气冷却到 20°C （而不是凝成 0°C 的水），而其它燃烧物的温度都冷却到反应物的初始温度时，单位燃料完全燃烧所放出的热量即低发热量。

两种发热量的区别仅在于水的状态和温度有所不同。经过计算， $1\text{kg } 0^\circ\text{C}$ 的水变成 20°C 的水蒸气要吸热 2512kJ 。对于固体和液体燃料而言，燃烧产物中的水分有两个来源：一是燃料中的水分，二是燃料中 H 燃烧时生成的水， 1kg H 可生成 9kg 水。所以 1kg 燃料燃烧后具有的水分为：

$$\frac{w_w^y}{100} + 9 \frac{w_H^y}{100}$$

因此两种发热量之间存在有下列关系：

$$\begin{aligned} \{Q_g - Q_d\}_{\text{kJ kg}^{-1}} &= 2512 \left(\frac{w_w^y}{100} + 9 \frac{w_H^y}{100} \right) \\ &\approx 25(w_w^y + 9w_H^y) \end{aligned} \quad (1-2)$$

固体和液体燃料发热量可以用量热计实测，这属于燃料工业分析的主要内容；也可以用公式计算，计算固体和液体燃料发热量的门捷列夫近似公式如下：

$$\{Q_g^y\}_{\text{kJ kg}^{-1}} = 339w_C^y + 1256w_H^y + 109(w_O^y - w_S^y) \quad (1-3)$$

$$\{Q_d^y\}_{\text{kJ kg}^{-1}} = 339w_C^y + 1030w_H^y - 109(w_O^y - w_S^y) - 25w_w^y \quad (1-4)$$

用应用基成分算出的发热量在 Q 右上角加附标“ y ”，但在实际应用中往往省略该角标。

计算气体燃料发热量可用下式：

$$\{Q_g\}_{\text{kJ m}^{-3}} = 128\varphi_{\text{CO}} + 128\varphi_{\text{H}_2} + 399\varphi_{\text{CH}_4} + 639\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6} + 251\varphi_{\text{H}_2\text{S}} \quad (1-5)$$

$$\{Q_d\}_{\text{kJ m}^{-3}} = 128\varphi_{\text{CO}} + 108\varphi_{\text{H}_2} + 360\varphi_{\text{CH}_4} + 599\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6} + 231\varphi_{\text{H}_2\text{S}} \quad (1-6)$$

式中 φ_{CO} 、 φ_{H_2} 、…代表这些组成的体积分数（略去百分号）。如果用干成分代入上式，则算出的是干成分发热量，若用湿成分代入，得到的便是湿成分的发热量。

不同的燃料有不同的发热量，燃烧同样重量的不同燃料则有不同的供热效果。当加热一定数量的金属时，采用发热量高低不同的燃料，如果都规定同样的燃料消耗量就不合理了。为了比较不同燃料的燃烧发热能力，正确规定燃料消耗指标，须将不同燃料统一换算成标准燃料。所谓标准燃料就是人为规定的发热量为 29300kJ/kg (7000kcal/kg) 的燃料。例如淮南

煤发热量 $Q_d = 24970 \text{ kJ/kg}$, 1 kg 淮南煤相当标准燃料 $b = 24970/29300 = 0.852 \text{ kg}$, 记作 0.852 kg 标燃。

§ 1-3 燃料燃烧过程的分析计算

为了正确设计和使用加热炉, 保证炉内热工过程的顺利进行, 需要确定燃料燃烧过程中的一些参数, 这些参数是: 空气需要量、燃烧产物量、燃烧产物的成分和密度、燃烧温度等。

计算上述参数有两种方法: 分析计算法和概略计算法。本节只介绍分析计算法, 有关概略计算法的内容列入本章第四节。分析计算法是以燃料中各组成物的燃烧反应式为基础, 已知燃料的应用基成分或湿成分, 并将各组成的分子量近似地取为整数(如氢的分子量为 2.016 , 计算时取为 2)。为统一起见, 燃烧前后的气体都按标准状态计算, 且认为标准状况下的 1 mol 分子气体的体积为 22.4 L 。

一、空气需要量与燃烧产物量

对于固体和液体燃料, 在计算中物质的量的单位为 kmol (千摩尔)。

100 kg 应用基燃料中含有 $w_C^y/12 \text{ kmol}$ 的 C 、含有 $w_H^y/2 \text{ kmol}$ 的 H 、...

按燃烧反应式确定各组成在燃烧时所需的氧气和生成物的物质的量(单位为 kmol)列入表 1-5。由表 1-5 可知, 燃烧 100 kg 燃料所需氧气的量为

$$\frac{w_C^y}{12} + \frac{w_H^y}{4} + \frac{w_S^y}{32} - \frac{w_O^y}{32} \quad \text{kmol}$$

表 1-5 100 kg 燃料完全燃烧的理论需氧量及燃烧产物量

组成物质 量 分 数	组成物的物质的量 kmol	反应式各成分比值	所需氧的物质的量 kmol	燃烧产物的物质的量/kmol			
				CO_2	H_2O	SO_2	N_2
w_C^y	$\frac{w_C^y}{12}$	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 1 : 1 : 1	$\frac{w_C^y}{12}$	$\frac{w_C^y}{12}$			
w_H^y	$\frac{w_H^y}{2}$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 1 : $\frac{1}{2}$: 1	$\frac{w_H^y}{4}$		$\frac{w_H^y}{2}$		
w_O^y	$\frac{w_O^y}{32}$		$-\frac{w_O^y}{32}$				
w_N^y	$\frac{w_N^y}{28}$	$\text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2$ 1 : 1					$\frac{w_N^y}{28} + \text{空气带入}$
w_S^y	$\frac{w_S^y}{32}$	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ 1 : 1 : 1	$\frac{w_S^y}{32}$			$\frac{w_S^y}{32}$	
w_W^y	$\frac{w_W^y}{18}$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$			$\frac{w_W^y}{18}$		
w_A^y							

考虑到每 kmol 气体在标准状态下的体积为 22.4 m^3 ，空气中氧气所占体积分数为 21%，则燃烧 1 kg 燃料所需空气体积为：

$$\begin{aligned} \{l_0\}_{\text{m}^3/\text{kg}}^{-1} &= \frac{22.4}{100} \left(\frac{w_C^Z}{12} + \frac{w_H^Z}{4} + \frac{w_S^Z}{32} - \frac{w_O^Z}{32} \right) + 21\% \\ &= 0.0889w_C^Z + 0.2667w_H^Z + 0.0333(w_S^Z - w_O^Z) \end{aligned} \quad (1-7)$$

实际上燃料和空气难以混合得十分均匀，例如 1 kg 煤燃烧时需要 $7 \sim 8 \text{ m}^3$ 空气，要将这么多的空气和煤充分混合几乎是不可能的。燃烧过程中，和可燃物接触的空气参与燃烧，而未与可燃物接触的空气就不能参与燃烧，可见，仅按上面计算得出的空气量供给空气，燃料不能全部燃烧。为了使燃料充分燃烧，必须多供给一些空气。按燃烧反应式计算出的空气需要量 l_0 ，称为理论空气需要量，实际供给的空气量以 l_n 表示，可写为：

$$l_n = n l_0 \quad (1-8)$$

式中 n 称为空气消耗系数。在要求充分燃烧的情况下， n 总是大于 1，而：

$$\Delta l = l_n - l_0 = (n - 1)l_0 \quad (1-9)$$

称为过剩空气量。

影响 n 值的因素很多，包括有：燃料的种类、燃料燃烧前的准备（如固体燃料的破碎、筛分、液体燃料的雾化、燃料与空气的混合等）、炉子构造、操作管理水平等等。在一般情况下， n 取值范围如表 1-6 所示。

表 1-6 空气消耗系数 n

燃料种类	燃烧方法	n
固体燃料	人工加煤	1.3~1.4
	机械加煤	1.2~1.3
	燃烧煤粉	1.15~1.25
液体燃料	低压喷嘴	1.10~1.15
	高压喷嘴	1.20~1.25
气体燃料	无焰燃烧	1.03~1.05
	有焰燃烧	1.05~1.20

燃烧产物是指燃烧后生成的气态物质，亦称炉气。从炉膛排出的炉气被称为烟气、废气等。燃烧产物由三部分组成：燃料中可燃物燃烧后的产物、燃料中不参加燃烧的气态物质和助燃空气带入的氮气。其中前两部分可直接从表 1-5 中查出。因此，燃烧 1 kg 燃料的燃烧产物量为：

$$\begin{aligned} \{V_0\}_{\text{m}^3/\text{kg}}^{-1} &= \frac{22.4}{100} \left(\frac{w_C^Z}{12} + \frac{w_S^Z}{32} + \frac{w_H^Z}{2} \right) + \frac{22.4}{100} \left(\frac{w_N^Z}{28} + \frac{w_W^Z}{18} \right) + 79\% \{l_0\}_{\text{m}^3/\text{kg}}^{-1} \\ &= \{l_0\}_{\text{m}^3/\text{kg}}^{-1} + 0.056w_H^Z + 0.007w_O^Z + 0.008w_N^Z + 0.0124w_W^Z \end{aligned} \quad (1-10)$$

V_0 为理论燃烧产物量。当空气消耗系数 $n > 1$ 时，实际炉气中还有过剩空气。因此，实际燃烧产物量为：

$$V_n = V_0 + (n - 1)l_0 \quad (1-11)$$

对于气体燃料，在计算时直接按体积计算。根据燃烧反应式可以编制出表 1-7。

表1-7 100m³燃料完全燃烧的理论需氧量及燃烧产物量

组成物体 积 分 数	反应式各成分比值	需氧量 m ³	燃烧产物量/m ³			
			CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
$\varphi_{H_2}^*$	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ $1 : \frac{1}{2} : 1$	$\frac{\varphi_{H_2}^*}{2}$		$\varphi_{H_2O}^*$		
φ_{CO}^*	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$ $1 : \frac{1}{2} : 1$	$\frac{\varphi_{CO}^*}{2}$	φ_{CO}^*			
$\varphi_{C_nH_m}^*$	$C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right)O_2 \rightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O$ $1 : \left(n + \frac{m}{4}\right) : n : \frac{m}{2}$	$\left(n + \frac{m}{4}\right)\varphi_{C_nH_m}^*$	$n\varphi_{C_nH_m}^*$	$\frac{m}{2}\varphi_{C_nH_m}^*$		
$\varphi_{H_2S}^*$	$H_2S + 1\frac{1}{2}O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$ $1 : 1\frac{1}{2} : 1 : 1$	$\frac{3}{2}\varphi_{H_2S}^*$		$\varphi_{H_2O}^*$	$\varphi_{SO_2}^*$	
$\varphi_{H_2O}^*$	$H_2O \rightarrow H_2O$ $1 : 1$			$\varphi_{H_2O}^*$		
$\varphi_{N_2}^*$	$N_2 \rightarrow N_2$ $1 : 1$					$\varphi_{N_2}^* + \text{空气带入}$
$\varphi_{O_2}^*$		$-\varphi_{O_2}^*$				
$\varphi_{CO_2}^*$	$CO_2 \rightarrow CO_2$		$\varphi_{CO_2}^*$			

参照上述计算固（液）体燃料空气需要量和燃烧产物量的方法，利用表 1-7 中列出的数据，可求得燃烧气体燃料的理论空气需要量和理论燃烧产物量：

$$\{l_o\}_{m^3, m^{-3}} = \frac{4.76}{100} [0.5\varphi_{H_2}^* + 0.5\varphi_{CO}^* + (n + 0.25m)\varphi_{C_nH_m}^* + \cdots + 1.5\varphi_{H_2S}^* - \varphi_{O_2}^*] \quad (1-12)$$

$$\begin{aligned} \{V_o\}_{m^3, m^{-3}} = & \frac{1}{100} [\varphi_{H_2}^* + \varphi_{CO}^* + (n + 0.5m)\varphi_{C_nH_m}^* + 2\varphi_{H_2S}^* + \varphi_{CO_2}^* + \varphi_{N_2}^* + \varphi_{H_2O}^*] \\ & + 0.79\{l_o\}_{m^3, m^{-3}} \end{aligned} \quad (1-13)$$

由式（1-8）和式（1-11）求得 l_a 、 V_a 。

前面求空气量和燃烧产物量时，没有考虑空气中的含水量，精确计算时应加入此项。此外，燃烧重油时若用蒸汽雾化，在所求得的燃烧产物量中还应加入此蒸汽量。

二、燃烧产物的成分

燃烧产物中各组成的体积分数称为燃烧产物的成分。若燃料成分已知，则可利用表1-5、表 1-7 提供的数据，计算出燃烧产物中各组成的含量，进而求出燃烧产物成分。亦可用下式计算：