

高等学校教学用书

燃料及燃烧

冶金工业出版社

高等学校教学用书

燃料及燃烧

北京钢铁学院 韩昭仑 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 16 字数 377 千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷

印数 00,001~4,000 册

统一书号: 15062·4124 定价 1.65 元

前 言

本书是根据一九七八年冶金部所属高等院校热工及热能利用专业“燃料及燃烧”课程的教学大纲编写的。本书分四篇十六章。第一篇各章介绍了各类燃料的物理化学性能及成分。第二篇讲述燃料及燃烧的计算方法。第三篇分析了燃烧的基本原理。第四篇着重叙述了实现燃烧的方法和所用的燃烧装置及一些技术问题。

本书的绪论、第一篇、第三篇中的第八章及第四篇中的第十三章第十五章、第十六章由北京钢铁学院韩昭沧、薄宗昭同志编写；第二篇、第三篇（不包括第八章）及第四篇的第十四章由东北工学院郭伯伟同志编写。由韩昭沧担任主编。

本书可作为“工业热工及热能利用专业”的教学用书，也可供有关工程技术人员参考。

由于编者水平有限，本书难免有不妥之处，敬希校内外同志提出宝贵意见。

编写本书时引用了国内外许多论文资料，在此，对文献的作者谨致谢意。

目 录

绪论	1
第一篇 燃料概论	3
第一章 固体燃料	3
第一节 煤的种类及其化学组成	3
第二节 煤的使用性能和分类	7
第二章 液体燃料	11
第一节 石油的加工及其产品	11
第二节 液体燃料在冶金工业中的应用	12
第三章 气体燃料	17
第一节 单一气体的物理化学性质	17
第二节 煤气成分的表示方法及发热量计算	18
第三节 高炉煤气	19
第四节 焦炉煤气	20
第五节 发生炉煤气	20
第六节 天然气	21
第七节 重油裂化气	22
第八节 转炉气	23
第二篇 燃烧反应计算	26
第四章 空气需要量和燃烧产物生成量	27
第一节 空气需要量的计算	27
第二节 燃烧产物的生成量、成分和重度（完全燃烧的计算）	29
第三节 不完全燃烧的燃烧产物	32
第五章 燃烧温度	37
第一节 燃料理论发热温度的计算	38
第二节 理论燃烧温度的计算	40
第三节 影响理论燃烧温度的因素	44
第六章 空气消耗系数及不完全燃烧热损失的检测计算	47
第一节 燃烧产物气体成分的测定和验证	47
第二节 空气消耗系数的检测计算	50
第三节 不完全燃烧热损失的检测计算	53
第三篇 燃烧基本原理	65
第七章 燃烧反应速度和反应机理	66
第一节 化学反应速度	66
第二节 可燃气体的燃烧反应机理	67
第三节 碳的燃烧反应机理	71
第四节 燃烧过程中氧化氮生成机理	72
第八章 射流混合过程	73
第一节 静止气体中的自由射流	74
第二节 同向平行流中的自由射流	76
第三节 交叉射流	78

第四节	环状射流和同心射流	81
第五节	旋转射流	83
第九章	着火过程	90
第一节	着火过程和着火温度	91
第二节	点火过程	94
第三节	着火浓度界限	95
第四节	燃烧室中的着火和熄灭	97
第十章	燃烧传播过程	101
第一节	燃烧前沿面的概念及其传播机理	102
第二节	燃烧前沿正常传播速度	103
第三节	紊流燃烧前沿的传播	108
第十一章	火焰的结构及其稳定	110
第一节	预混火焰	111
第二节	扩散火焰	117
第十二章	异相燃烧	124
第一节	碳的异相反应速度	124
第二节	碳粒的燃烧	129
第三节	油粒的燃烧	131
第四篇	燃烧方法与燃烧装置	134
第十三章	气体燃料的燃烧	134
第一节	概述	134
第二节	有焰燃烧	135
第三节	无焰燃烧	153
第四节	火焰的稳定性、火焰监测和保焰技术	166
第十四章	液体燃料的燃烧	170
第一节	燃料油的燃烧过程	170
第二节	油的雾化	173
第三节	燃油烧嘴	180
第十五章	固体燃料的燃烧	198
第一节	固体燃料的层状燃烧	198
第二节	粉煤燃烧法	206
第三节	旋风燃烧法	211
第四节	沸腾燃烧法	216
第十六章	煤的气化	219
第一节	概述	219
第二节	影响气化指标的主要因素	222
第三节	煤气发生炉生产过程的强化	225
第四节	几种常用的煤气发生炉	227
第五节	煤气的净化	228
第六节	气化新技术	231
附表		239
主要参考书		246

绪 论

燃料燃烧学是工业热工及热能利用专业的一门专业基础课，是工业炉热工工作者必须掌握的基本知识。

燃烧现象广泛存在于人类社会之中。从日常生活到工业交通及空间技术等部门，都要涉及到如何以燃料作为热能来源和合理组织燃烧过程的问题。

燃料的燃烧从其最终结果来看，是物质间的一种能量转换过程。它是通过燃料和氧化剂在一定条件下所进行的具有放热和发光特点的剧烈氧化反应，将燃料的内能转化为热能。在历史上，人们曾把燃料的燃烧看作是一种化学现象。但是，燃烧化学反应需具有一定的反应条件，例如反应物质的浓度和温度，这便与气体运动、分子扩散、热量传递等物理因素有关。因此，现代燃烧学认为，从整个燃烧过程来看，燃料的燃烧是物理化学现象的综合过程，这些物理化学现象之间互助联系和制约，并以其综合关系决定着燃料燃烧的最终结果。特别是在工业炉的燃烧条件下，由于燃烧空间、燃料与空气的混合过程以及反应物质的浓度与温度的分布都和流体介质的速度分布密切相关。因此，燃烧空间的气体动力场的结构及其热力条件往往是影响整个燃烧过程的主要的、甚至是决定性的因素。基于这一情况，所以在工业炉燃烧技术的研究和发展中，常把侧重点放在燃烧的物理过程方面，例如研究有关气流混合及回流区形成规律等问题。在此基础上掌握控制火焰长度，提高火焰稳定性和强化燃烧过程的手段。

燃烧学便是研究燃烧过程基本规律及其应用技术的科学。这是一门年青的学科。虽然早在几十万年以前，人类已掌握了用火的技术，但是直到十八世纪（1773年）法国科学家 La Voisier 发现了氧气之后，才正确揭示了燃烧的化学本质。二十世纪以来开始形成燃烧学的完整体系，并不断发展。燃烧学的内容概括来说包括两部分，即燃烧理论和燃烧技术。

燃烧理论着重研究燃烧过程所包括的各个基本现象，例如燃烧反应机理，可燃混合气体的着火和熄灭，火焰的传播机理、火焰的结构、单一油滴和碳粒的燃烧等。它主要是运用化学、传热传质学及流体力学的有关理论，由简及繁地说明各种燃烧基本现象的物理化学本质。在有些文献和著作中把燃烧学的这一部分叫做燃烧化学和燃烧物理学，并根据研究的重点逐渐形成了一些新的分支，如火焰光谱学、燃烧空气动力学、化学反应流体力学、流体化学热力学、计算燃烧学等。在工业炉领域中有关各类燃料的燃烧速度、燃烧稳定性、火焰的流场和结构、火焰辐射、燃烧声响、燃烧污染物生成机理、以及燃烧过程数学模型的建立等都是燃烧理论要研究的重要课题。

燃烧技术主要是把燃烧理论中所阐明的物理概念和基本规律与实际工程中的燃烧问题联系起来，对现有的燃烧方法进行分析和改进，对新的燃烧方法进行探讨和实验，以不断提高燃料利用率和燃烧设备的技术水平。

在不同的领域里，对燃烧技术有着不同的要求，对各种工业炉来说，燃料的燃烧主要是为取得热能，并以火焰为媒介将热能传给被加热的物体。随着生产技术的发展，以及工艺过程的要求，各种大型、快速、连续和自动化工业炉相继出现。这些现代化的大型工业

炉不仅要求配备大功率的燃烧装置以满足炉子热负荷的需要，而且还往往根据生产工艺的特点对燃烧技术提出一些特殊的要求。尤其是在降低能源消耗，节约燃料资源这一重大课题方面，根据生产工艺的特点，合理组织工业炉中的燃烧过程更是一项重要的措施。因此，当前工业炉燃烧技术研究的主要问题有：针对不同燃料的燃烧特性提出合理的燃烧方法；根据生产工艺的具体要求研究并设计特殊性能的新型燃烧装置；研究高效率节能型燃烧装置；研究低噪音、低污染的燃烧技术以及为实现工业炉的计算机控制提供燃烧过程的数学模型。

燃烧学的研究方法包括数学分析和模型实验研究两方面。但是，尽管大型电子计算机的出现为通过理论预示实际问题开展了广泛的前景，但是，在世界范围内，对于生产中提出的燃烧技术问题主要还只能是通过实验来研究解决。目前燃烧理论的作用主要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，从而对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，通过实验取得定量关系和结论，仍然是当前解决燃烧技术问题的主要手段。

合理组织炉内的燃烧过程，从来就是提高燃料利用效率和改进炉子工作的一项重要措施。随着我国科学技术的发展，特别是在广泛开展节约能源活动的推动下，我国科技工作者在发展燃烧新技术和研制各种新型燃烧装置方面做了大量工作，并取得了可喜成果。燃烧技术对提高工业炉的热效率和改进工业炉热工作所起的重要作用也日益引起各工业部门的重视。因此，通过本课程的学习，掌握有关燃料燃烧的基本原理和基本知识，不仅是进一步学习本专业各门专业课的基础，而且也是今后从事工业炉技术工作，不断发展和提高工业炉科学技术水平所不可缺少的一环。

在内容安排上，本教科书包括四部分，即

第一篇 燃料概论。着重介绍各种工业燃料的使用性能；

第二篇 燃烧反应计算。主要根据燃烧反应前后的物质平衡和热平衡介绍工业炉燃烧计算方法；

第三篇 燃烧基本原理 主要介绍与工业炉燃烧过程有关的各种基本概念和基本理论；

第四篇 燃烧技术 分别介绍气体、液体和固体燃料的燃烧方法和燃烧装置以及煤的气化技术方面的基本知识。

第一篇 燃 料 概 论

自然界中可供工业生产使用的燃料资源主要是煤、石油和天然气。不同的生产部门，对所用燃料的性质往往提出不同的要求。此外，随着科学技术的发展，煤、石油和天然气已不只是工业生产的热能来源，而且还是化学工业的宝贵原料。因此，为了合理地利用燃料资源和满足不同生产部门对燃料性质的要求，必须把各种天然燃料再做进一步的加工。例如冶金工业是燃料的巨大消费者，并且对所用燃料也有着一些特殊的要求。为了有效地使用燃料和掌握生产工艺对燃料的技术要求，本篇将分别介绍各种燃料的特点和使用性能。

第一章 固 体 燃 料

天然固体燃料可分为两大类，即木质燃料和矿物质燃料，前者在工业生产中很少使用，故不予介绍。

矿物质固体燃料主要是煤，它不仅是现代工业热能的主要来源，随着科学技术的发展，煤将越来越多地用于化学工业，进行综合利用。

在冶金生产中，煤主要用于炼焦和气化，但在某些中小型企业中，煤也直接被用作工业炉窑的燃料。煤是锅炉的主要燃料。

第一节 煤的种类及其化学组成

一、煤的种类

根据生物学、地质学和化学方面的判断，煤是由古代植物变来的，中间经过了极其复杂的变化过程。根据母体物质炭化程度的不同，可将煤分为四大类，即泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤。

1. 泥煤 泥煤是最年青的煤，也就是由植物刚刚变来的煤。在结构上，它尚保留着植物遗体的痕迹，质地疏松，吸水性强，含天然水份高达40%以上，需进行露天干燥，风干后的体积比重为300~450公斤/米³。在化学成分上，与其他煤种相比，泥煤含氧量最多，高达28%~38%，含碳较少。在使用性能上，泥煤的挥发分高，可燃性好，反应性强，含硫量低，机械性能很差，灰分熔点很低。在工业上，泥煤的主要用途是用来烧锅炉和做气化原料，也可制成焦炭供小高炉使用。由于以上特点，泥煤的工业价值不大，更不适于长途运输，只可作为地方性燃料在产区附近使用。

2. 褐煤 褐煤是泥煤经过进一步变化后所生成的，由于能将热碱水染成褐色而得名。它已完成了植物遗体的炭化过程，在性质上与泥煤有很大的不同。与泥煤相比，它的密度较大，含碳量较高，氢和氧的含量较小，挥发分产率较低，体积比重750~800公斤/米³。褐煤的使用性能是粘结性弱，极易氧化和自燃，吸水性较强。新开采出来的褐煤机

械强度较大，但在空气中极易风化和破碎，因而也不适于远地运输和长期储存，只能作为地方性燃料使用。

3. 烟煤 烟煤是一种炭化程度较高的煤。与褐煤相比，它的挥发分较少，密度较大，吸水性较小，含碳量增加，氢和氧的含量减少。烟煤是冶金工业和动力工业不可缺少的燃料，也是近代化学工业的重要原料。烟煤的最大特点是具有粘结性，这是其他固体燃料所没有的，因此它是炼焦的主要原料。应当指出的是，不是所有的烟煤都具有同样的粘结性，也不是所有具有粘结性的煤都适于炼焦。为了适应炼焦和造气的工艺要求来合理地使用烟煤，有关部门又根据粘结性的强弱及挥发分产率的大小等物理化学性质，进一步将烟煤分为长焰煤、气煤、肥煤、结焦煤、瘦煤等不同的品种。其中，长焰煤和气煤的挥发分含量高，因而容易燃烧和适于制造煤气。结焦煤具有良好的结焦性，适于生产优质冶金焦炭，但因在自然界储量不多，为了节约使用起见，通常在不影响焦炭质量的情况下与其他煤种混合使用。

4. 无烟煤 这是矿物化程度最高的煤，也是年龄最老的煤。它的特点是密度大，含碳量高，挥发分极少，组织致密而坚硬，吸水性小，适于长途运输和长期储存。无烟煤的主要缺点是受热时容易爆裂成碎片，可燃性较差，不易着火。但由于其发热量大（约为7000千卡/公斤），灰分少，含硫量低，而且分布较广，因此受到重视。据有关部门研究，将无烟煤进行热处理后，可以提高抗爆性，称为耐热无烟煤，可以用于气化，或在小高炉和化铁炉中代替焦炭使用。

二、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。根据元素分析值，煤的主要可燃原素是碳，其次是氢，并含有少量的氧、氮、硫，它们与碳和氢一起构成可燃化合物，称为煤的可燃质。除此之外，在煤中还或多或少地含有一些不可燃的矿物质灰分（A）和水分（W），称为煤的惰性质。一般情况下，主要是根据煤中C、H、O、N、S诸元素的分析值及水分和灰分的百分含量来了解该种煤的化学组成。现将各组分的主要特性说明如下。

碳（C） 碳是煤的主要可燃元素，它在燃烧时放出大量的热。煤的炭化程度越高，含碳量就越大。各种煤的可燃质中含碳量大致如表1-1所示。

表 1-1 煤中可燃质的含碳量

煤 的 种 类	C%	煤 的 种 类	C%
泥 煤	~70	粘 结 煤	83~85
褐 煤	70~78	强粘结煤	85~90
非粘结性煤	78~80	无 烟 煤	90以上
弱粘结性煤	80~83		

氢（H） 氢也是煤的主要可燃元素，它的发热量约为碳的三倍半，但它的含量比碳小得多。图1-1给出了煤的含氢量与炭化程度的关系。由图中可看出，当煤的炭化程度加深时，随着含碳增加时，氢的含量是逐渐增加的，并且在含碳量为85%时达到最大值。以后在接近无烟煤时，氢的含量又随着炭化程度的提高而不断减少。

应当指出，氢在煤中有两种存在形式。一种是和碳、硫结合在一起的氢，叫做可燃

氢，它可以进行燃烧反应和放出热量，所以也叫有效氢。另一种是和氧结合在一起，叫做化合氢，它已不能进行燃烧反应。在计算煤的发热量和理论空气需要量时，氢的含量应以有效氢为准。

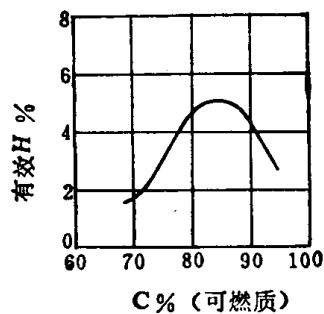


图 1-1 煤的含氢量

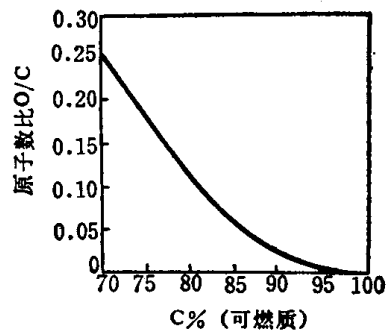


图 1-2 煤的含氧量与炭化程度的关系

氧 (O) 氧是煤中的一种有害物质，因为它和碳、氢等可燃元素构成氧化物而使它们失去了进行燃烧的可能性。煤中的含氧量一般不直接测定，而是根据其他成分的测定值用下式间接算出。

$$O\% = 100\% - [C\% + H\% + S\% + N\% + A\%] \frac{100}{100 - W} \quad (1-1)$$

氮 (N) 氮在一般情况下不参加燃烧反应，是燃料中的惰性元素。但在高温条件下，氮和氧形成 NO_x ，这是一种对大气有严重污染作用的有害气体。煤中含氮量约为0.5~2%，对煤的干馏工业来说，是一种重要的氮素资源，例如，每100公斤煤可利用其中氮素回收7~8公斤硫酸铵。

硫 (S) 硫在煤中有三种存在形态，

- a) 有机硫 ($S_{机}$) 来自母体植物，与煤成化合状态，均匀分布；
- b) 黄铁矿硫 ($S_{矿}$) 与铁结合在一起，形成 FeS_2 ；
- c) 硫酸盐硫 ($S_{盐}$) 以各种硫酸盐的形式 (主要是 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和 $FeSO_4$) 存在于煤的矿物杂质中。

有机硫和黄铁矿硫都能参与燃烧反应，因而总称为可燃硫或挥发硫。而硫酸盐硫则不能进行燃烧反应。

硫在燃料中是一种极为有害的物质。这是因为，硫燃烧后生成的 SO_2 和 SO_3 能危害人体健康和造成大气污染，在加热炉中能造成金属的氧化和脱碳，在锅炉中能引起锅炉换热面的腐蚀，而且，焦炭中的硫还能影响生铁和钢的质量。因此，作为冶金燃料，对其含硫量必须严格控制。例如炼焦用煤在入炉以前必须进行洗选，以除掉黄铁矿硫和硫酸盐硫，根据有关资料介绍，焦炉洗精煤的含硫量应控制在0.6%以下为好。

灰分 (A) 所谓灰分，指的是煤中所含的矿物杂质 (主要是碳酸盐、粘土矿物质、以及微量稀土元素等) 在燃烧过程中经过高温分解和氧化作用后生成一些固体残留物，大致成分是： SiO_2 40~60%； Al_2O_3 15~35%； Fe_2O_3 5~25%； CaO 1~15%； MgO 0.5~8%； $Na_2O + K_2O$ 1~4%。

煤中的灰分是一种有害成分，这不仅是因为它直接关系到冶金焦炭的灰分含量从而影响高炉冶炼的技术经济指标，而且，对一些烧煤的工业炉来说，灰分含量高的煤，不仅降

低了煤的发热量，而且还容易造成不完全燃烧并给设备维护和操作带来困难。

对炼焦用煤来说，一般规定入炉前的灰分不应超过10%。

对各种烧煤的工业炉来说，除了应当注意灰分的含量以外，更要注意灰分的熔点。熔点太低时，灰分容易结渣，有碍于空气流通和气流均匀分布，使燃烧过程遭到破坏。

由于灰分是多种化合物构成的，因此它没有固定的熔点，只能以灰分试样软化到一定程度时的温度作为灰分的熔点。一般是将试样做成三角锥形，并以试样软化到半球形时的温度作为熔点。

灰分的熔点与灰分的组成及炉内的气氛有关，其熔点约在1000~1500℃之间。一般来说，含硅酸盐(SiO_2)和氧化铝(Al_2O_3)等酸性成分多的灰分，熔点较高，含氧化铁(Fe_2O_3)、氧化钙(CaO)、氧化镁(MgO)、以及氧化钾($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)等碱性成分多的灰分，熔点较低。如以酸性成分与碱性成分之比作为灰分的酸度，即

$$\text{酸度} = \frac{\text{SiO}_2\% + \text{Al}_2\text{O}_3\%}{\text{Fe}_2\text{O}_3\% + \text{CaO}\% + \text{MgO}\%} \quad (1-2)$$

则酸度接近1时灰分熔点低，酸度大于5时，灰分熔点高达1350℃以上。

此外，灰分在还原性气氛中的熔点比在氧化性的气氛中高，二者相差约40~170℃。

水分(W) 水分也是燃料中的有害组分，它不仅降低了燃料的可燃质，而且在燃烧时还要消耗热量使其蒸发和将蒸发的水蒸气加热。

固体燃料中的水分包括两部分。

1) 外部水分(也叫做湿分或机械附着水)指的是不被燃料吸收而是机械地附着在燃料表面上的水分，它的含量与大气湿度和外界条件有关，当把燃料磨碎并在大气中自然干燥到风干状态后即可除掉。

2) 内部水分 指的是达到风干状态后燃料中所残留的水分，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矿物杂质中的矿物结晶水。由此可见，内部水分只有在高温分解时才能除掉。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。

三、成分表示方法及其换算

固体燃料的成分通常是用各组分的重量百分数来表示。

前面已经谈到，各种煤都是由C、H、O、N、S、灰分(A)、水分(W)七种组分所组成，包括全部组分在内的成分，习惯上把它叫做应用基。上述各种组分在应用基中的重量百分数叫做燃料的“应用成分”，即

$$\text{C}^{\text{ap}}\% + \text{H}^{\text{ap}}\% + \text{O}^{\text{ap}}\% + \text{N}^{\text{ap}}\% + \text{S}^{\text{ap}}\% + \text{A}^{\text{ap}}\% + \text{W}^{\text{ap}}\% = 100\% \quad (1-3)$$

煤的含水量(全水分)很容易受到季节、运输和存放条件的影响而发生变化，所以燃料的应用成分经常受到水分的波动而不能反映出燃料的固有本质。为了便于比较，常以不含水分的干燥基中的各组分的百分含量来表示燃料的化学组成，称为“干燥成分”，即

$$\text{C}^{\text{d}}\% + \text{H}^{\text{d}}\% + \text{O}^{\text{d}}\% + \text{N}^{\text{d}}\% + \text{S}^{\text{d}}\% + \text{A}^{\text{d}}\% = 100\% \quad (1-4a)$$

煤中的灰分也常常受到运输和存放条件的影响而有所波动，为了更确切地说明煤的化学组成特点，可以只用C、H、O、N、S五种元素在可燃基中的百分含量来表示燃料的成分，叫做可燃成分，即

$$\text{C}^{\text{c}}\% + \text{H}^{\text{c}}\% + \text{O}^{\text{c}}\% + \text{N}^{\text{c}}\% + \text{S}^{\text{c}}\% = 100\% \quad (1-4b)$$

上述各种成分的表示方法之间可以进行换算，换算系数为下表所示。

表 1-2 成分换算系数

已 知 成 分	要 换 算 成 分		
	可 燃 成 分	干 燥 成 分	应 用 成 分
可燃成分	1	$\frac{100 - A^{\text{干}}}{100}$	$\frac{100 - (A^{\text{用}} + W^{\text{用}})}{100}$
干燥成分	$\frac{100}{100 - A^{\text{干}}}$	1	$\frac{100 - W^{\text{用}}}{100}$
应用成分	$\frac{100}{100 - (A^{\text{用}} + W^{\text{用}})}$	$\frac{100}{100 - W^{\text{用}}}$	1

〔例题 1〕 试将下列煤的成分换算成应用成分：

C _煤	H _煤	O _煤	N _煤	S _煤	A _干	W _用
72%	5%	20%	2%	1%	12.5%	20%

解 首先应求出灰分的供用成分，即

$$A^{\text{用}}\% = A^{\text{干}}\% \frac{100 - W^{\text{用}}}{100} = 12.5\% \frac{100 - 20}{100} = 12.5\% \times 0.8 = 10\%$$

然后，根据 $A^{\text{用}}\%$ 和 $W^{\text{用}}\%$ 进行其他成分的换算

$$C^{\text{用}}\% = C^{\text{煤}}\% \frac{100 - (A^{\text{用}} + W^{\text{用}})}{100} = 72\% \frac{100 - (10 + 20)}{100} = 72\% \times 0.7 = 50.4\%$$

同理，

$$H^{\text{用}}\% = 5\% \times 0.7 = 3.5\%$$

$$O^{\text{用}}\% = 20\% \times 0.7 = 14.0\%$$

$$N^{\text{用}}\% = 2\% \times 0.7 = 1.4\%$$

$$S^{\text{用}}\% = 1\% \times 0.7 = 0.7\%$$

第二节 煤的使用性能和分类

为了合理地利用煤资源和正确制定煤利用的工艺技术方案和操作制度，除了解煤的化学组成外，还必须了解有关它的使用性能。

一、煤的工业分析值

煤的工业分析内容是测定水分、灰分、挥发分和固定碳的百分含量。

把煤在隔离空气的情况下加热时（即一般所说的干馏），随着温度的升高，煤将发生以下的变化。

温 度 °C	变 化
100~150	水分蒸发
150~200	放出所吸收的CO ₂
200~250	化合物明显分解
300	开始放出含焦油很多的气体（各种轻碳氢化合物）
350~400	可燃质激烈分解，放出CH ₄ ，H ₂ ，C ₂ H ₄ ，以及其他焦油蒸气）
450	放出大量焦油气
500	焦油气逐渐减少
1000~1100	完全停止一切气体逸出，形成固体焦炭。

在上述干馏过程中，除外部水分外，逸出的全部气体称为挥发分（V），它主要是由煤的矿物结晶水、挥发性成分、热分解产物等构成，包括CO₂，CO，H₂，CH₄，C_mH_n，N₂，以及一部分热解水和矿物结晶水。

挥发分逸出后所剩下的固体残留物叫做焦块。其中的碳素称为煤的固定碳即

$$\text{固定碳}\% = 100\% - (W\% + A\% + V\%)$$

根据国家标准，煤的工业分析是将一定重量的煤加热到110℃，使其水分蒸发，以测出水分的含量，再在隔绝空气的条件下加热到850℃，并测出挥发分的含量，然后通以空气使固定碳全部燃烧，以测出灰分和固定碳的含量。

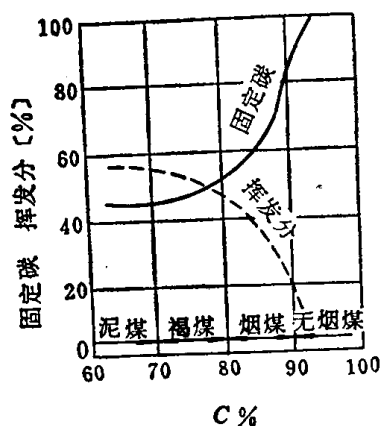


图 1-3 固定碳以及挥发分与炭化程度关系

挥发分和固定碳的含量与炭化程度有关。如同从图 1-3 中所看到的，随着炭化程度的提高，挥发分逐渐减小，固定碳不断增多。

挥发分多的煤，干馏时可以得到较多的煤气和焦油，燃烧时火焰较长。固定碳多的煤，干馏时焦炭的收得率高。因此，煤的工业分析值是确定煤的用途和制定工艺制度时不可缺少的原始依据。

二、煤的发热量

发热量大小是评价燃料质量好坏的一个重要指标，也是计算燃烧温度和燃料消耗量时不可缺少的依据。

工程计算中规定，1公斤煤完全燃烧后所放出的燃烧热叫做它的发热量，单位千卡/公斤。

燃料的发热量有两种表示方法，即

高发热量 $Q_{\text{高}}$ 指的是燃料完全燃烧后燃烧产物冷却到使其中的水蒸气凝结成0℃的水时所放出的热量；

低发热量 $Q_{\text{低}}$ 指的是燃料完全燃烧后燃烧产物中的水蒸气冷却到20℃时放出的热量。

煤的发热量可以用氧弹式量热计直接测定，也可以用下列方法计算：

1. 根据工业分析值计算发热量 我国煤炭科学院曾提出以下公式

$$\text{褐煤} \quad Q_{\text{低}} = 10F + 6500 - 10W - 5A - \Delta Q (\text{千卡/公斤}) \quad (1-5)$$

$$\text{烟煤} \quad Q_{\text{低}} = 50F - 9A + K - \Delta Q (\text{千卡/公斤}) \quad (1-6)$$

$$\text{无烟煤} \quad Q_{\text{低}} = 100F + 3(V - W) - K' - \Delta Q (\text{千卡/公斤}) \quad (1-7)$$

式中 F 、 W 、 A 、 V 为煤的固定碳、水分、灰分、挥发分含量。 K 为常数，其值为

$V\%$	≤ 20		$>20\sim30$		$>30\sim40$		>40	
粘结序数	<4	>5	<4	>5	<4	>5	<4	>5
K	4300	4600	4600	5100	4800	5200	5050	5500

K' 为常数 当 $V\%<3.5$ 时为1300；当 $V\%>3.5$ 时为1000；

ΔQ 为高发热量与低发热量的差值，

$$V\%>18\text{时}, \Delta Q=2.97(100-W-A)+6W$$

$$V\%\leq 18\text{时}, \Delta Q=2.16(100-W-A)+6W$$

2. 根据元素分析值计算发热量

1) 杜隆公式

$$Q_{\text{高}}=81C+342.5\left(H-\frac{O}{8}\right)+22.5S \text{ (千卡/公斤)} \quad (1-8)$$

2) 门捷列夫公式

$$Q_{\text{高}}=81C+300H-26(O-S) \text{ (千卡/公斤)} \quad (1-9)$$

$$Q_{\text{低}}=81C+246H-26(O-S) \text{ (千卡/公斤)} \quad (1-10)$$

3) 高低发热量的换算公式

$$Q_{\text{低}}=Q_{\text{高}}-6(9H+W) \text{ (千卡/公斤)} \quad (1-11)$$

煤的发热量与炭化程度也有一定关系（见图1-4），随着炭化程度的提高，发热量不断增大，当含碳量为87%左右时，发热量达到最大值，以后则开始下降。因此煤的发热量大小也常被用作煤分类的依据。

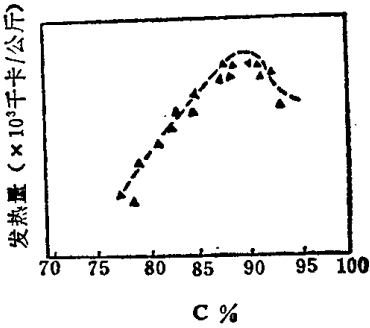


图 1-4 炭化程度与发热量的关系

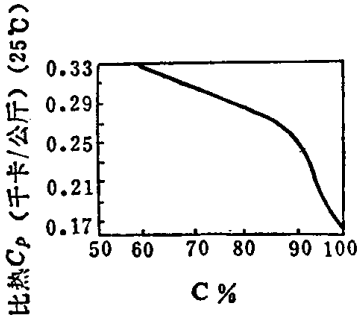


图 1-5 炭化程度与比热关系

三、比热、导热系数

煤在室温条件下的比热约为0.2~0.4千卡/公斤·℃，并随炭化程度的提高而变小(图1-5)。一般来说泥煤为0.33，褐煤为0.29，烟煤为0.24~0.26，石墨为1.56。实验发现常温条件下，煤的比热与水分和灰分含量成线性关系，并可用下式计算，

$$c_p=(0.24C^{\#}\%+1W\%+0.165A\%)/100 \text{ 千卡/公斤}^{\circ}\text{C} \quad (1-12)$$

式中 c_p ——恒压比热；

$C^{\#}\%$ ——煤中碳的可燃成分；

$W\%$ ——煤中水分含量；

A%——煤中灰分含量。

煤的导热系数一般为0.2~0.3千卡/米·小时℃,并随炭化程度和温度的升高而增大,一般炼焦煤在干馏温度范围内的导热系数可用下式计算

$$\lambda = 0.104 + 0.468t/10^3 + 0.468t^2/10^6 \quad \text{千卡/米} \cdot \text{小时} \cdot \text{℃} \quad (1-13)$$

四、粘结性、结焦性

所谓煤的粘结性指的是粉碎后的煤在隔绝空气的情况下加热到一定温度时,煤的颗粒相互粘结形成焦块的性质。

煤的结焦性是指煤在工业炼焦条件下,一种煤或几种煤混合后的粘结性,也就是煤能炼出冶金焦的性质。

因此,煤的粘结性和结焦性是两个不同的概念,但两者在本质上又有相同之处,一般来说,粘结性好的煤结焦性就比较强。

了解煤的粘结性和结焦性是很重要的,它不仅可以使我们知道某种煤是否适于炼焦,而且对于煤的气化和燃烧性能也有很大的影响。例如具有强粘结性的煤在气化和燃烧时,由于煤的粘结,容易结成大块,严重影响气流的均匀分布。

煤的粘结性的测定方法以坩埚法最为普遍,它是在实验室条件下用坩埚法测定挥发分产率之后,对所形成的焦块进行观察,根据焦块的外形分为七个等级,称为粘结序数,以此来评定粘结性的强弱,各粘结序数的代表特征是,

- 1——焦炭残留物均为粉状;
- 2——焦炭残留物粘着,以手轻压即成粉状;
- 3——焦炭残留物粘结,以手轻压即碎成小块;
- 4——不熔化粘结,用手指用力压方裂成小块;
- 5——不膨胀熔化粘结,成浅平饼状,表面有银白色金属光泽;
- 6——膨胀熔化粘结,表面有银白色金属光泽,且高度不超过15毫米;
- 7——强膨胀熔化粘结,表面有银白色金属光泽,且高度大于15毫米。

五、煤的耐热性

煤的耐热性是指煤在加热时是否易于破碎而言。耐热性的强弱能直接影响到煤的燃烧和气化效果。耐热性差的煤(主要是无烟煤和褐煤),气化和燃烧时容易破碎成碎片,妨碍气体在炉内的正常流通,并容易发生烧穿现象,使气化过程变坏。

无烟煤耐热性低的原因主要是由于其结构致密,加热时因内外温差而引起膨胀不均,造成了煤的破裂。但经过热处理后,可以改善其耐热性。至于褐煤的耐热性差,主要是由于内部水分大量蒸发所致。

六、反应性和可燃性

煤的反应性是指煤的反应能力,也就是燃料中的碳与二氧化碳及水蒸气进行还原反应的速度。反应性的好坏是用反应产物中CO的生成量和氧化层的最高温度来表示。CO的生成量越多,氧化层的温度越低,则反应性就越好。

煤的可燃性指的是燃料中的碳与氧发生氧化反应的速度,即燃烧速度。

煤的炭化程度越高,则反应性和可燃性就越差。

综合以上可以看出,不同品种和不同产区的煤,其物理化学和工艺性能往往差别很大。为了合理地利用煤的资源,必须根据煤的特性加以分类研究。

煤的分类方法很多，都是根据某一方面的特征作为基础。对于动力等工业，通常只把煤按化学性质分为无烟煤、烟煤、褐煤等类型。对于其他工业部门，例如，炼焦工业和化学合成工业，有时需要根据某些特殊要求将煤分的更细一些。

进行煤的分类是一项巨大的工作，目前国际间还没有一个统一的标准，各国、各个产地的煤都有其独特的性质，而且各国对煤的分析实验方法也不完全相同，所以都有各自分类的方法，但基本上都按挥发分的多少、粘结性的强弱、发热量的高低等作为基础。我国煤的分类方案可见附表1（煤炭科学研究院提出）。

第二章 液 体 燃 料

液体燃料有天然液体燃料和人造液体燃料两大类。前者指石油及其加工产品，后者主要指从煤中提炼出的各种燃料油。

第一节 石油的加工及其产品

石油是一种天然的液体燃料，也叫原油。它是一种黑褐色的粘稠液体，由各种不同族和不同分子量的碳氢化合物混合组成，它们主要是一些烷烃(C_nH_{2n+2})、环烷烃(C_nH_{2n})、芳香烃(C_nH_{2n-6})和烯烃(C_nH_{2n})。此外，还含有少量的硫化物、氧化物、氮化物、水分和矿物杂质。

根据产地不同，原油的物理化学性质也往往有所不同。一般将轻馏分多的原油叫轻质原油。轻馏分少的叫重质原油。根据所含碳氢化合物的种类，可将原油分为

1. 石蜡基原油 含石蜡族（烷烃 C_nH_{2n+2} ）碳氢化合物较多。高沸点馏分中含有大量石蜡。我国大庆原油和中东阿拉伯原油即属此类。从这种原油中可以得到粘度指数较高的润滑油和燃烧性能良好的煤油，缺点是所产汽油的辛烷数较低，加工时需有专门的脱蜡系统。

石蜡族的碳氢化合物是一种链状结构的饱和性碳氢化合物，当碳的原子数 $n>4$ 时，又有所谓正烷烃（直链结构）和异烷烃（侧链结构）之分，并互相构成各种同素异性体。当 $n=1\sim4$ 时，在常温下呈气体状态，是天然气的主要成分。当 $n=5\sim15$ 时，常温下呈液体状态，是煤油的主要成分。

2. 烯基原油 含烯烃(C_nH_{2n})较多，从中可以得到少量辛烷数高的汽油和大量优质沥青。它的优点是含蜡少，所以便于炼制柴油和润滑油。缺点是汽油产量小，润滑油粘度指数低，煤油容易冒烟。

烯烃和烷烃一样，也是原油的主要成分，但因它是不饱和烃，所以化学稳定性和热稳定性都比烷烃差，在高温和催化剂作用下，很容易转化成芳香族碳氢化合物。

3. 中间基原油 烷烃和烯烃的含量大体相等，也叫混合基原油，从中可以得到大量直馏汽油和优质煤油，缺点是汽油的辛烷数不高，含蜡较多。

4. 芳香基原油 含芳香烃较多，在自然界中储存量很少，从中可以得到辛烷数很高的汽油和溶解力很强的溶剂，缺点是它产生的煤油容易冒烟。我国台湾原油即属此类。

芳香烃是一种环状结构的不饱和碳氢化合物，其基本形式是 C_nH_{2n-6} ，由于是不饱和烃，因此化学活性较强，容易置换成其他产品。

目前常用的原油加工方法主要是分馏法和裂解法。

一、分馏法

直接分馏法是把原油加热，利用各种分馏产物沸点不同而把它们分别提取出来。根据分馏塔工作压力的不同，又可分为常压分馏和减压分馏两种。

常压分馏法 由于塔内工作压力接近大气压力，故名常压分馏。经过常压分馏可以得到石油气、汽油、挥发油、煤油、柴油等沸点在350℃以下的石油产品（表2-1）。

表 2-1

名 称	沸 点 ℃	比 重 公斤/升
汽油：航空汽油	40~150	0.71~0.74
汽车汽油	50~200	0.73~0.76
轻挥发油	100~240	0.77~0.79
煤油	200~320	0.80~0.83
粗柴油	230~360	0.84~0.88

减压分馏法 塔内压力一般只有30~80毫米汞柱，甚至低到10毫米汞柱以下，故又称真空分馏，用来处理沸点高于350℃以上的重质馏分，以提高轻质产品的收得率。例如提炼沸点为350~500℃的粗柴油和轻质润滑油等。

二、裂解法

用直接分馏法只能分馏出分子量较小的轻质油品。为了提高原油中轻质油品的产量，特别是汽油的产量，可将直接分馏塔剩下的残渣或某些分子量较大的重质油品进一步在高温高压条件下进行分解，叫做裂解法。根据工艺特点的不同，又分为热裂解和催化裂解等多种型式，一般反应温度多在400~600℃左右，压力为10~15气压，甚至40~70气压。

第二节 液体燃料在冶金工业中的应用

在冶金炉和其他工业炉上使用的液体燃料主要是重油，下面重点介绍重油的种类及其有关特性。

一、重油的来源和种类

重油从广义来说，是原油加工后各种残渣油的总称。根据原油加工方法的不同，又可以把重油分为直馏重油和裂化重油两大类。

1. 直馏重油 即原油经直接分馏后所剩下的渣油，例如常压渣油和减压渣油。其中常压渣油可以作为炉用燃料使用，减压渣油因含沥青质较多，粘度太大，常需配一部分柴油进行稀释后方可使用。

2. 裂化重油 即原油经过裂解处理后所剩下的渣油，它除了含有更多的不饱和烃以外，还含有大量的游离碳素，因此，很不容易燃烧，不能直接作为燃料油使用，还必须加进一部分轻质油品进行调质，以提高其燃烧性能。

市场上按一定牌号供应的商品重油，就是用上述各种渣油加进一部分轻油配制而成的。我国的商品重油共分四种牌号，即20、60、100和200号重油。每种牌号的命名是按照该种