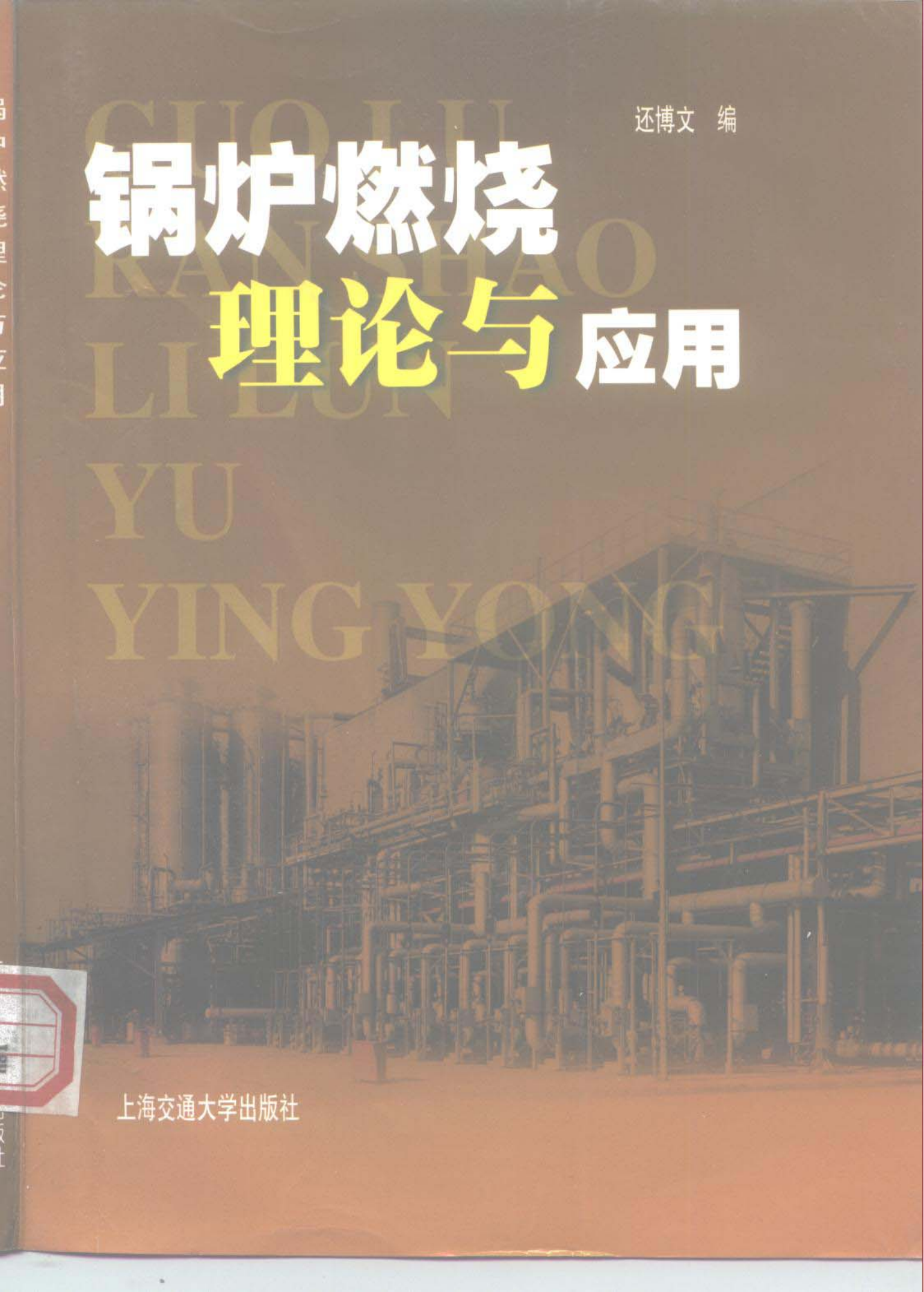


还博文 编

锅炉燃烧 理论与应用



上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

锅炉燃烧理论与应用/还博文编. - 上海:上海交通大学出版社, 1999.9
上海交通大学“九五”重点教材
ISBN 7-313-02243-3

I. 锅… II. 还… III. 锅炉燃烧-研究-高等学校-教材
IV. TK223.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 30977 号

锅炉燃烧理论与应用

还博文 编

上海交通大学出版社出版发行
上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030
电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本:787×1092(mm) 1/16 印张:15.25 字数:373 千字

版次:1999 年 9 月 第 1 版

印次:1999 年 9 月 第 1 次

ISBN 7-313-02243-3/TK·064

定价:25.00 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

前 言

本世纪 80 年代以来,我国能源和电力生产进入了一个持续快速发展的历史时期。“八五”计划以来,全国电厂装机容量每年平均递增 1000~1500 万千瓦以上,这在世界各国电力工业发展史上是罕见的。预计到本世纪末,全国总装机容量将达到 2.9 亿千瓦。届时,我国电力生产长期滞后于国民经济发展的形势可基本得到缓和。但是,我国能源系统固有特点将不会改变,即:能源人均储量少;开发难度大;能源与经济布局不匹配;以煤为主的能源结构直至下世纪初叶仍不会得到根本调整。鉴于这种情况,煤的清洁高效利用技术的开发和利用,便是我国电力工业解脱经济增长与环境保护双重压力并纳入可持续发展道路的唯一合理和可行的技术途径。基于这点,本书的编写即以煤燃烧技术及燃烧过程中污染物控制方式作为重点内容,并充分反映我国近年来引进、消化和吸收国际先进的锅炉技术的情况。

本书在编述体系上,作了某些新的尝试。出于燃烧设备高效、清洁、高可用率和大调峰幅度的综合要求,在相关章节中,对有关的发展前沿状况均给予了侧重叙述。在燃烧理论章节中,从反应热力学角度,对 $C-O$ 和 $C-H-O$ 系燃烧反应给出了更为明晰的诠释。有关炉内辐射换热计算方法,书中根据可能收集到的资料,作了较全面的评介。炉内燃烧污染物生成与控制章节中,反映了最近几年以来的研究成果。

本书经上海发电设备成套设计研究所宋汉武高工审阅并提出宝贵意见,这里谨致谢意。

编 者

目 录

第 1 章 燃料特性	1
1.1 动力用化石质燃料	1
1.2 动力用煤	2
1.2.1 煤的生成和岩相组成	2
1.2.2 煤的组成、基准和换算关系	3
1.2.3 动力用煤的种类和质量分类标准	5
1.2.4 煤的机械和热物理性质	8
1.2.5 煤的灰分组成及相关性质	12
1.2.6 煤的条件性燃烧特性指标	21
1.3 液体和气体燃料	23
1.3.1 液体燃料	23
1.3.2 气体燃料	25
第 2 章 燃烧反应的热力学和动力学基础	26
2.1 燃烧反应热力学	26
2.1.1 反应的吉布斯自由能变化	26
2.1.2 反应势、反应进度和反应平衡常数	27
2.1.3 相平衡和相律	30
2.1.4 燃烧热	31
2.2 燃烧反应的热力学分析	32
2.2.1 C—O 系燃烧反应	32
2.2.2 H—O 和 C—H—O 系燃烧反应	36
2.3 燃烧反应动力学	37
2.3.1 燃烧反应速度	37
2.3.2 影响燃烧反应速度的主要因素	38
第 3 章 煤燃烧特性及过程	41
3.1 煤燃烧的物理模型	41
3.2 碳非均相燃烧的反应过程	44
3.2.1 扩散动力燃烧的总体反应速度	44
3.2.2 碳燃烧的化学反应	46
3.2.3 炭骸燃尽时间	47
3.2.4 各种因素对炭骸燃烧过程的影响	48

3.3	煤着火过程	50
3.3.1	能量平衡和热平衡	51
3.3.2	热平衡状态的稳定性	53
3.3.3	着火和熄火	53
3.4	煤粉一元系统燃尽工况	53
3.4.1	煤粉悬浮燃烧时的燃尽速度	54
3.4.2	若干因素对煤粉燃尽过程的影响	55
第4章	气体和液体燃料的燃烧	57
4.1	气体燃料的燃烧	57
4.1.1	气体燃料燃烧原理	57
4.1.2	气体燃料燃烧技术与设备	62
4.2	液体燃料的燃烧	63
4.2.1	重油燃烧原理	63
4.2.2	重油的雾化和喷油嘴	68
4.2.3	重油燃烧器的配风和稳焰	73
4.3	燃料的混燃	78
第5章	煤的燃烧技术和设备	80
5.1	煤燃烧技术方式	80
5.1.1	层燃方式及设备特性	80
5.1.2	流化床燃烧方式及设备特性	88
5.1.3	煤粉悬浮燃烧方式	102
5.2	煤粉炉燃烧设备	112
5.2.1	旋流燃烧器	112
5.2.2	直流燃烧器	122
5.2.3	煤粉炉燃烧室设备的设计布置特性	136
5.3	常用的煤粉炉炉型	147
第6章	炉内传热计算方法	157
6.1	炉内传热的相似理论解法	157
6.1.1	炉内传热相似理论解法的原理简析	157
6.1.2	炉内燃料输入热和辐射吸热平衡	159
6.1.3	炉内传热相似理论解法的归纳结果	160
6.1.4	相关参数的确定方法	163
6.1.5	有关灰污系数、热有效性系数和炉膛黑度计算的说明	165
6.1.6	炉内传热相似理论解法的改进及准确性评价	166
6.2	炉内传热的分区段计算方法	169
6.2.1	分区段计算方法的原理	169

6.2.2	炉内传热的分区段计算方法	170
6.2.3	液态排渣炉和旋风炉炉内传热计算方法简介	173
6.3	炉内辐射换热过程的数值模拟	175
6.3.1	数值模拟方法的分类及简述	175
6.3.2	炉内换热过程数值模拟结果示例	181
第7章	燃烧污染物的生成与控制	183
7.1	燃烧污染物排放状况及控制标准	183
7.1.1	我国燃烧污染物的排放现状	183
7.1.2	燃烧污染物的排放控制标准	185
7.2	燃烧污染物的生成机理和炉内控制方法	187
7.2.1	亚微米浮尘	188
7.2.2	硫氧化物 SO_x 的生成与控制	189
7.2.3	氮氧化物 NO_x 的生成与控制	192
7.3	清洁燃烧技术的应用前景	202
7.3.1	增压流化床(PFBC)及其用于联合循环	203
7.3.2	煤气化联合循环发电装置(IGCC)	204
7.3.3	燃煤 IGCC 与燃料电池(FC)组合发电系统	205
7.3.4	水煤浆燃烧技术	207
7.3.5	燃煤联合循环电站的技术经济比较	210
第8章	锅炉燃烧设备的运行	213
8.1	锅炉燃烧设备的运行调整	213
8.1.1	燃烧调整试验	213
8.1.2	若干燃烧工况参数对燃烧工况质量的影响	216
8.2	燃烧设备的运行特性	218
8.2.1	炉内辐射换热过程的特性	218
8.2.2	供风工况对炉内过程的影响	220
8.2.3	其他因素对炉内过程的影响	222
8.2.4	锅炉燃烧设备系统的动态特性	223
8.3	煤粉炉若干运行问题	224
8.3.1	煤粉燃烧器的点火装置和炉膛安全系统	224
8.3.2	煤粉炉的沾污结渣问题	226
8.3.3	受热面烟侧腐蚀问题	230
8.3.4	液态排渣炉析铁问题	231
	参考文献	233

第1章 燃料特性

1.1 动力用化石质燃料

迄今,地球所蕴藏的天然矿物燃料,都可视为地质史上太阳能的积累,主要包括煤、石油和天然气。油母页岩成矿过程与石油类似,形态上属于固体燃料。这些矿物燃料都是古生物经过漫长的地质物理化学变化过程后形成的化石质燃料。天然矿物燃料在工艺过程中还可以衍生为加工燃料,如冶金炉和气化炉煤气,高品位燃料油和渣油、石油焦,以及专门制备的油煤浆、水煤浆、型煤和煤液化燃料等。在不远的将来,二次能源——电力的生产将毫无例外地需燃用经过前处理加工的次生矿物燃料,以满足日趋严格的环保要求及达到更高的经济和安全性指标。

地球上化石质燃料的地质储量迄今尚未完全探明,但无可置疑,其中固体燃料占大部分。大致上,化石矿物能源中 80% 的探明储量是煤。

我国从总体上看是能源资源丰富的国家,但人均拥有量低,约为世界平均水平的 1/2,而石油和天然气人均探明储量只相当世界平均值的 1/8。资源状况决定了我国只能采取以电力为中心,以煤炭为基础,合理利用多种能源的发展战略。直至 2000 年,煤在一次能源消耗构成中仍要占到 70%。据 1995 年资料,我国煤炭保有储量为 10087 亿吨,占世界第三位,其中相当于世界能源委员会定义的探明储量约占 30%。我国煤炭年产量约为 12 亿吨,发电用煤只占其中 28%,拟在本世纪末提高到 33% 以上。因而在相当长的一个时期内,煤电为主的格局不会改变。我国的煤炭资源主要蕴藏在华北西部和西北地区。到本世纪末下世纪初,只有山西、蒙西、陕西和宁夏作为煤炭生产基地,有能力成为煤炭输出省区,这四个地区煤炭保有储量占全国 65% 以上,届时其年产量将占全国总产量的一半。目前,我国原煤入洗率约为 30%,动力用煤几乎都是原煤,平均含灰量在 16.8% 以上,其中干燥基全硫含量 $S_{ad} \geq 1.5\%$ 的高硫煤约占动力用煤的 1/3。因此,我国电站锅炉是以燃用低质煤为特点的,这为采用清洁和高效的燃烧技术增加了技术难度。

我国电站行业中,原则上不使用燃料油发电,燃料油一般仅用于点火和低负荷调峰时稳燃,消耗量有限。另外也极少使用天然气,只有冶金行业自备电站中以冶金炉煤气作辅助燃料与煤混烧,由于煤层气(煤层甲烷)开发项目的启动,今后情况或许有所改观。

煤直接用于两气联合循环和磁流体发电装置时,带来极大的技术和工艺困难,在技术经济上迄今也未获突破性进展。从发展趋势看,转而使用经过气化或液化的煤转化加工燃料才是可行的。即使是对传统的煤粉室燃方式,使用前处理后的洁净煤,并采用清洁燃烧技术,也将使电力生产面貌为之改观,可获得巨大的经济和环境效益。所以,电力工业燃用原煤的技术路线,应予摒弃。预料,在世纪交替之后,设置在矿口、路口、港口和城市负荷中心的大型发电厂,均将燃用洁净煤,采用清洁燃烧技术,并配有尾气处理设施。而煤洗选加工后的尾品,则采用循环流化床燃烧方式在矿口中、小型热电厂中予以利用和处理,其低温燃烧后的增钙灰渣可用作建材原

料。煤输送方式将由铁路和水路运输传统方式,转为同时兼用管道输煤技术。工业炉和窑炉也将燃用由专门的工厂制备的型煤或水煤浆。另外,煤气化和液化技术将臻于成熟,经清洁化处理的加压气化煤气将作为城市煤气供给民用。使用煤加工转化燃料的联合循环发电技术亦将逐步代替传统的单一蒸汽循环方式。

总之,我国动力用化石质燃料的资源配置格局虽然一时不可能改变,但其利用技术即将迎来或已经步入根本变革的时代。

1.2 动力用煤

1.2.1 煤的生成和岩相组成

煤炭的生成要经过漫长的地质时期,我国具有工业开采价值的煤层,其成煤期为石炭纪、二叠纪和侏罗纪。成煤过程包括泥炭化和煤化两个阶段。泥炭化阶段是植物体伴随发生生物化学变化的沉积过程;而煤化阶段则是随其沉入地层后,在高温和高压作用下,经过物理和化学变化的成煤过程。褐煤是较近地质年代生成的青年煤产物,随着地质年代变得久远,进而生成烟煤和无烟煤。

煤的岩相组成很复杂。各种煤炭组分对应于不同的成煤条件和阶段。煤岩显微观察中,可以发现六种微晶纹理和七种岩相结构,其相互关系示于图 1-1。岩相结构组分分为:

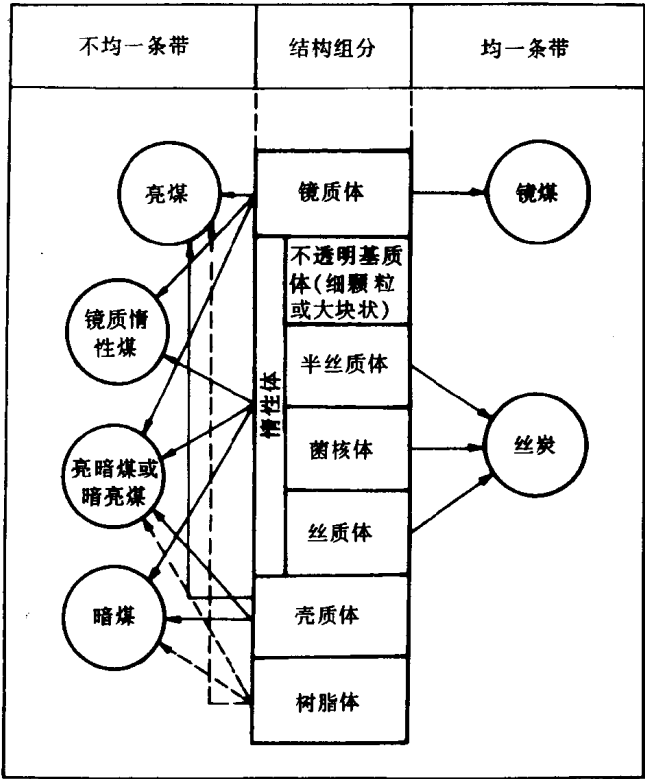


图 1-1 硬煤的组织成分和层带

(1) 镜质体 由木质纤维素生成,受热时软化、粘结、易碎,灰分含量低。

- (2) 不透明基质体 成因复杂,尚无明晰结论,焦化时不粘结,属于惰性组类,反应极不活泼。
- (3) 丝质体和半丝质体 属于化石木炭,灰分含量高,丝质体中尚能分辨出细胞组织。
- (4) 菌核体 有明显的蕈类组织痕迹,特性与半丝质体相同。
- (5) 壳质体 即沥青质,主要形成于含脂类物质较多的植物分泌物。
- (6) 树脂体 没有固定组织,主要由树脂和蜡质成分生成。

上述岩相组分包容在标志煤种特征的六种纹理条带中,即:炭、镜煤、壳煤、暗煤、镜质惰性煤和亮暗或暗亮煤。煤的岩相构成直接影响其燃烧特性。挥发分产率和析出速率都与岩相构成相关。经验表明,挥发分相等的不同煤种,着火和燃烧特性往往有不同程度的差异,其原因即在于此。

1.2.2 煤的组成、基准和换算关系

煤是由可燃物质、无水的不可燃矿物质(灰质)和水分构成的,其原生情况和在热变化过程中的组成演变示意图 1-2。

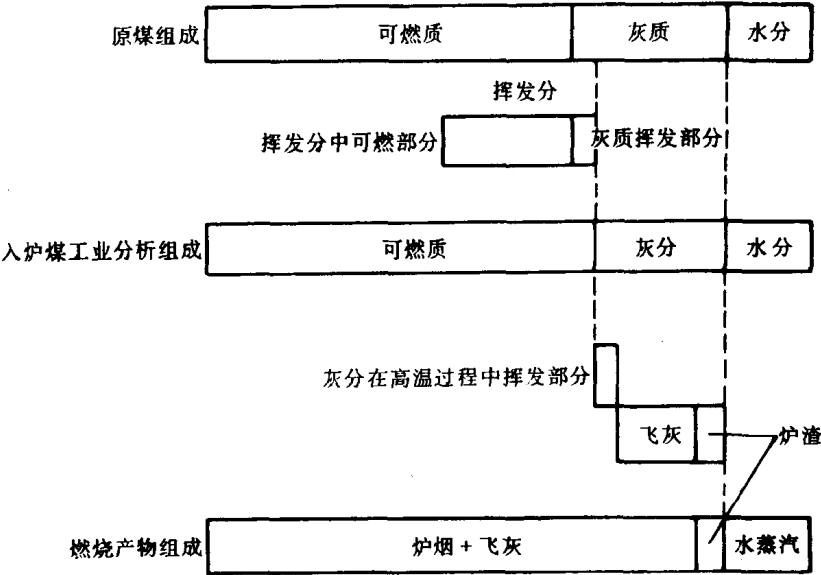


图 1-2 煤及其燃烧产物的组成

1. 煤的可燃物质组成

煤的可燃物质的化学元素组成为碳、氢、氧、氮和硫。它们组成碳氢有机化合物,当煤化程度很深时,也有结晶碳(煤晶)析出。

- (1) 碳 碳是煤中主要的可燃元素。纯碳不易着火和燃尽。煤化程度深化时,煤的碳含量增加。
- (2) 氢 煤中氢元素是以碳氢化合物形态存在的,受热时裂解析出及着火燃烧。煤化程度深化时,氢含量有下降的趋势。
- (3) 氧 煤中氧的含量及其存在直接影响着煤的性质。氧含量的变化范围很大,煤化程度加深时其含量下降。

(4) 氮 煤中氮化合物主要是由植物蛋白转化生成的,通常谓之“燃料氮”。其含量较低,煤化程度深时,稍有降低。

(5) 硫 硫是煤中有害物质。煤中硫分赋存形态分为有机硫(S_o)和无机硫两类,而后者又由硫铁矿硫(S_p)和硫酸盐硫(S_s)组成。高硫煤有时会有微量元素硫析出。煤中各类硫分的总和称为全硫分(S_t)。其中有机硫、硫铁矿硫和元素硫均参与燃烧过程,故合称为可燃硫分(S_{daf})。硫分含量与煤化程度无关,一般 S_{daf} 含量为 0.5%~1.5%,而高硫煤可达 4%~7%。

2. 矿物质和灰分

煤的矿物质(灰质)是由原生、次生及煤开采过程中混入的各种无机矿物组成,在燃烧过程中,经过极为复杂的物理和化学变化过程后,成为灰渣。通常使用灼烧法测定煤的表征炉内过程中形成的灰分含量,即在测定方法规程规定的 815℃ 进行常气氛下灰化,直待残留物恒重时,即可测得煤的灰分。灰化过程中灰质因一些组分热解和挥发而失重。灰质与灰分的质量比大致在 1.07~1.15 之间。煤灰分的化学组成是硅、铝、钙、镁、铁和少量的硫、钛、钾、钠、磷等元素的氧化物,这些元素也称为造灰元素。灰分组成及性质在 1.2.5 节将予以详细讨论。

3. 水分

煤中水分含量及其存在形态,与环境条件和煤的内部结构有关,一般可分为外在或表面水分(M_t),内在水分(M_{mh})以及微量的与矿物组分结合的结晶水和化合水。外在和内在水分的总和称为全水分(M_t)。外在水分是指煤炭开采、洗选和储运过程中,吸附在煤颗粒表面和大的孔隙中的水分。当煤置于空气中风干时,外在水分即陆续蒸发,直至在对应于一定的相对湿度的空气中达到稳定为止,此时的失水就定义为外在水分。内在水分是指吸附和包蓄在煤颗粒内部毛细孔隙中的水,由于毛细吸附力作用,它只有在温度达到 100℃ 以上时,才能从煤中完全蒸发出来。煤的孔隙度(孔隙比容积)与煤化程度有关,因此内在水分的饱和值可以表征煤化程度。结晶水和化合水是以络合分子或离子形态参加矿物组分晶格构造的水分,通常只在 200℃ 以上才能离解析出。

4. 挥发分和固定碳

煤在受热时分解析出挥发性物质,在给定的加热条件下可以测得挥发分产率(V),其大部分是碳氢化合物,也含有少量的氮、二氧化碳和水蒸汽等。煤的挥发分随煤化程度加深而下降的规律性极明显,且它的测定方法简捷而易于标准化,因此多用做煤分类标准的第一分辨参数。

煤析出挥发分、焦炭物质中扣除灰分后剩余的就是固定碳(FC)。

5. 发热量

煤的发热量是单位质量的煤完全燃烧时所产生的热量,也泛称热值。通常用氧弹热量计测定。氧弹热量计直接测定出弹筒发热量,从中扣除硫和氮燃烧中生成硫酸和硝酸的溶解热后,就是煤的高位发热量(Q_{gr}),继而扣除煤中水分和氢燃烧生成的水蒸汽的潜热后,即为煤的低位发热量 Q_{net} 。这是煤在锅炉设备中可供利用的热量总量。应予以指出,氧弹热量测值是定容发热量,而实际锅炉燃烧室设备是在定压条件下连续工作的,应使用定压发热量。不过,由于在具体的工作条件下,两者差值极小,故予忽略。为了便于煤耗指标有可比性,常引用“标准煤”概念,规定标准煤低位发热量 $Q_{net, s}$ 为 29.3MJ/kg(7000kcal/kg)。

一般,在表征煤的化学组成时,常用元素分析和工业分析两组数据。元素分析和工业分析

的基准(按 GB483—87)为:

- (1) 收到基 以收到状态为计算基准,用下角标 ar 表示。大致与原来通用的应用基相当。
- (2) 空气干燥基 以环境条件下风干状态为计算基准,即与收到基比较失去了外在水分,相当于原分析基。该基准的下标为 ad。
- (3) 干燥基 失去全水分后煤的成分。煤水分是随机变化的,为了稳定表示灰分和其他组分质量百分比,常用干燥基示之,其下标为 d。
- (4) 干燥无灰基 即以煤中可燃物质为基准,可排除灰分和水对评价煤质的影响,相当于原可燃基。在发电用煤分类中,采用干燥无灰基挥发分指标最为恰当。其下标为 daf。
- 各种基准下组分计算平衡式见表 1-1。表中 C、H、O、N、S 和 A、M、FC、V 分别为煤的碳、氢、氧、氮、可燃硫和灰分、水分、固定碳、挥发分含量的质量百分比。

表 1-1 煤的各种基准计算平衡式

基 质		元 素 分 析	工 业 分 析
习惯名称	国标名称		
应用基	收到基	$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\%$	$FC_{ar} + V_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\%$
分析基	空气干燥基	$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\%$	$FC_{ad} + V_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\%$
干燥基	干燥基	$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\%$	$FC_d + V_d + A_d = 100\%$
可燃基	干燥无灰基	$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\%$	$FC_{daf} + V_{daf} = 100\%$

各基准间的换算系数列于表 1-2。应予指出,水分变化或基准改变对于低位发热量的计算,须计及相应引起的汽化潜热变动量。

表 1-2 不同基准的换算系数

所 求 已 知	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

1.2.3 动力用煤的种类和质量分类标准

1. 动力用煤种类

我国长期以来使用的煤分类方法是用可燃基挥发分和最大胶质层厚度作为分类指标的,它主要适用于冶金和煤化工行业。这一方法对于动力用煤不太适合。于是在此基础上,按燃烧特性和煤化程序予以约简,亦即按可燃基挥发分产率和表征煤化程度的固定碳高低分为下列几种(参见图 1-3)。

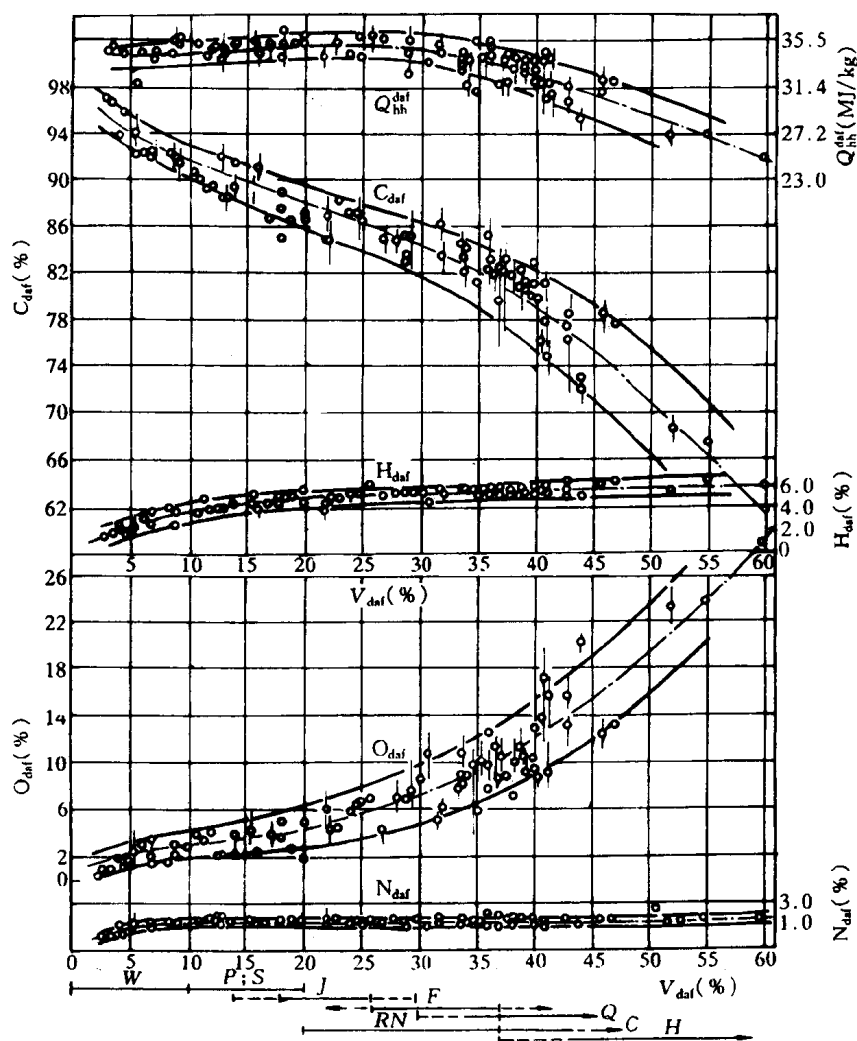


图 1-3 煤的可燃基元素组分及发热量的变化特性

(1) 无烟煤 是煤化程度最深的煤种,可燃质中碳含量为 93%~98%, $V_{daf} \leq 10\%$ 。它光泽感强,硬度高,纯煤真密度高达 $1.4\text{g/cm}^3 \sim 1.9\text{g/cm}^3$ 。通常无烟煤发热量较高,但由于挥发分低,反应特性差,不易着火和燃尽,被纳入劣质煤范畴。尤其是低灰熔点无烟煤,在锅炉燃用中解决着火稳燃和防止结渣之间的技术矛盾时非常棘手。我国无烟煤主要分布于华北、中南、西南和福建省区。

(2) 贫煤 动力用煤中的贫煤,实际上包括了焦煤分类中的贫煤和瘦煤两类。 V_{daf} 在 10%~20% 范围内。它的着火和燃尽特性优于无烟煤,但反应特性仍较迟钝。贫煤是主要动力用煤种类。

(3) 烟煤 是中等煤化程度的煤。它包括 V_{daf} 为 14%~30% 的焦煤到 $V_{daf} > 37\%$ 的长焰煤之间所有煤种牌号。在我国低灰分、焦结性较好的优质烟煤,不作动力用煤使用。中等以上灰分或洗选尾品——洗中煤则供给电厂使用。其燃烧特性尚可,价格低廉,适合燃用。但是灰分 $A_d > 40\%$ 的低热值烟煤,燃烧特性不良,还会降低电厂的技术经济性能,属于劣质烟煤范畴,目前在我国发电用煤中占有一定比例。

(4) 褐煤 煤化程度低,其 V_{daf} 为 40%~50%或更高。其中地质年代最近的青年褐煤也称为软褐煤,含超高水分(60%~75%),热值低。我国仅在云南阳宗海地区有这种褐煤。地质年代较久远的老年褐煤也称为硬褐煤,含中等水分(10%~40%)和高灰分(10%~40%)。我国硬褐煤主要分布于东北、内蒙古及山东省区。褐煤灰含钙高、灰熔点低、燃烧过程中易结渣。

2. 煤粉炉用煤质量特性及其标准

电站煤粉炉是相应于一定煤种和煤质而设计的,其运行的技术经济性能和可用率水平直接与用煤质量相关。因而工程实践中,当拟定有关标准,作为用煤质量特性的衡量尺度。我国 GB7562-87《火电煤粉锅炉用煤质量标准》即全面概括了发电用煤属性,可用于设计及运行管理部门对电厂用煤的选择,以及作为电厂购煤和配煤的技术依据。

表征发电用煤质量特性的指标包括挥发分 V , 灰分 A , 水分 M , 硫分 S 和煤灰软化温度 ST , 以及辅以低位发热量指标 Q_{net} 等六个参数。它们的分级界限,是依据有序量最优化分割法划分,并结合运行经验确定的。

在挥发分的最优分割中,建立了其与各非常规煤燃烧特性指标间以及锅炉机械未燃尽损失的关系,即根据它们之间的相关关系,利用数理统计上的最优分割法求得挥发分界限值的最优解。依此作出的挥发分分级结果,可正确表征煤化程度,并耦合了煤的着火和燃尽特性。同时,还辅以发热量分级指标,以纳入作为煤中惰载物质的水分和灰分对炉内燃烧稳定性的影响。灰分的分割结果,主要是基于其与运行经济性各因素间相关关系得来的。水分分割是依据其对燃料制备系统运行安全性和对燃烧稳定性的影响而作出的。硫分分割则依据尾部受热面的低温腐蚀、堵灰等运行经验进行。煤结渣特性采用灰流变特征显著、同时测值准确性高的软化温度 ST 来表示。

表 1-3 给出发电用煤质量标准(VAMSST 分类)。它以煤的可燃基挥发分 V_{daf} , 干燥基灰分 A_d , 外在水分 M_t 和全水分 M_t , 干燥基全硫 S_{td} 和煤灰软化温度 ST 作为主要质量分类指标,以收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$ 作为 V_{daf} 和 ST 的辅助分类指标。上述各分类指标划分有若干等级。例如某发电用煤标号为 $V_4A_1M_1S_2ST_1$, 它代表的煤种为: V_4 ——中高挥发分烟煤, $V_{daf} = 27\% \sim 40\%$, $Q_{net} > 15.5\text{MJ/kg}$; A_1 ——常灰分煤, $A_d \leq 24\%$; M_1 ——常水分煤, $M_t \leq 8\%$; S_2 ——中高硫分煤, $S_{td} = 1\% \sim 3\%$; ST_1 ——不易结渣煤, $ST > 1350^\circ\text{C}$ 。

表 1-3 发电煤粉锅炉用煤质量标准(GB7562—87)

分类指标	煤 种 名 称	等 级	代 号	主要分类指标界限值	辅助分类指标界限值
挥发分 ^① V_{daf}	(低挥发分无烟煤)		(V_0)	$V_{daf} \leq 6.5\%$	$Q_{net,ar} > 23.0\text{MJ/kg}^{\text{①}}$
	无 烟 煤	1 级	V_1	$6.5\% < V_{daf} \leq 9\%$	$Q_{net,ar} > 21.0\text{MJ/kg}$
	贫 煤	2 级	V_2	$9\% < V_{daf} \leq 19\%$	$Q_{net,ar} > 18.5\text{MJ/kg}$
	中挥发分烟煤	3 级	V_3	$19\% < V_{daf} \leq 27\%$	$Q_{net,ar} > 16.5\text{MJ/kg}$
	中高挥发分烟煤	4 级	V_4	$27\% < V_{daf} \leq 40\%$	$Q_{net,ar} > 15.5\text{MJ/kg}$
	高挥发分烟褐煤	5 级	V_5	$V_{daf} > 40\%$	$Q_{net,ar} > 11.5\text{MJ/kg}$
灰 分 A_d	常灰分煤	1 级	A_1	$A_d \leq 24\%$	
	中灰分煤	2 级	A_2	$24\% < A_d \leq 34\%$	
	高灰分煤	3 级	A_3	$34\% < A_d \leq 46\%$	
	(超高灰分煤)		(A_4)	$A_d > 46\%$	

续 表

分类指标	煤种名称	等级	代号	主要分类指标界限值	辅助分类指标界限值
水分 M_t	常水分煤	1级	M_1	$M_t \leq 8\%$	$V_{daf} \leq 40\%$
	高水分煤	2级	M_2	$8\% < M_t \leq 12\%$	
水分 M_t	常水分高挥发分煤	1级	M_1	$M_t < 22\%$	$V_{daf} > 40\%$
	高水分高挥发分煤	2级	M_2	$22\% < M_t \leq 40\%$	
	(超高水分褐煤)		(M_3)	$M_t > 40\%$	
硫分 S_{td}	低硫煤	1级	S_1	$S_{td} < 1\%$	
	中高硫煤	2级	S_2	$1\% < S_{td} \leq 3\%$	
	(特高硫煤)		(S_3)	$S_{td} > 3\%$	
灰熔融性 ST	不易结渣煤	1级	ST_1	$ST > 1350^\circ\text{C}$	$Q_{net,ar} > 12.5\text{MJ/kg}$
				ST 不限	$Q_{net,ar} < 12.5\text{MJ/kg}$
	(易结渣煤)		(ST_2)	$ST \leq 1350^\circ\text{C}$	$Q_{net,ar} > 12.5\text{MJ/kg}$

① 燃煤的 $Q_{net,ar}$ 低于相应数值时,则该煤种应归入 V_{daf} 低一级的等级内。

注:括号内的内容都是 GB7562—87 标准未列入的。

1.2.4 煤的机械和热物理性质

1. 基本物性

(1) 煤的密度 煤颗粒有一定孔隙度,通常用高浸润性液体或气体,采取压入置换法测得其干燥基密度后再以其水分数据折算出常态煤的真实材料密度。一般随煤化程度加深,从硬褐煤到无烟煤,密度值为 $1.0\text{t/m}^3 \sim 1.8\text{t/m}^3$ 。煤颗粒质量与其外表面包络的容积的比值称为煤视在(表观或折算)密度,煤化程度深的煤,孔隙度小,故视在密度趋向于它的真密度,反之则差别加大。煤的堆积密度与其粒度或块度相关。

(2) 煤的比热(容) 煤的可燃质和灰质的比热差可相等,工程计算中近似地取为一致。炉内过程中常用煤干燥基比热,而在 100°C 以下时则用常态煤比热。再者,当温度水平处于挥发分热解析出阶段时,用量热法测定比热则计入了挥发分析出时吸收的反应热。

(3) 煤的热导率 煤的热导率与煤种、水分和堆积密度有关,波动于 $0.6\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \sim 0.6\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间。

(4) 煤的堆积角 煤堆放时自然形成的坡面与水平面夹角即为堆积角,它与粒度和湿度大小有关。

以上各物理参数值,可在有关手册中查找。

2. 煤的可磨性

煤的可磨性表征破碎的难易程度,煤的可磨性指数是煤单位磨碎功消耗的度量,其测定方法根据磨碎定律,即碾磨煤粉时所消耗的能量与煤新增表面积成正比。通常广为采用的是哈德格罗夫(Hardgrove)法,其为美国材料试验协会(ASTM)标准方法,国际标准化组织(ISO)也规定其为硬煤可磨性指数测定的标准方法,我国亦已将其定为国家标准(GB2565—87),适用范围为无烟煤、贫煤和烟煤。哈氏方法是以美国一种易破碎的烟煤作为标准,规定其可磨性指数

为 100, 以此与被测定煤比较, 得到其相对可磨性。

哈氏可磨性指数 K_{HGI} 的具体测定方法是将质量为 50g、粒度在 0.59mm~1.19mm 范围内的煤样, 放入一个专用的小型中速磨煤机中进行粉磨, 磨制 60 转之后的样品用孔径为 0.0071mm 的筛子过筛, 其通过量为 M_p , 则哈氏指数为:

$$K_{HGI} = 13 + 6.93M_p \quad (1-1)$$

显然, K_{HGI} 数值越大, 则测试煤种越易磨碎。

另外, 前苏联和东欧国家, 还有以前我国也使用另一种全苏热工研究院(BTH)方法, 该法以前苏联一种最硬的顿巴斯无烟煤屑作为标准煤, 规定其可磨性指数为 1, 以标准煤和被测定煤磨制到同样细度的能耗之比, 作为相对的可磨性指数 K_{BTH} 。

上述两种方法的测定结果不是对所有煤种都有相关性的, 各种文献上介绍的换算关系式也多有出入, 建议不以换算结果作为确切依据。总的说来, 哈氏指数的重现性较好, 而 K_{BTH} 指数对于硬褐煤和油页岩也能适用。

煤化程度、煤岩类型和煤中灰质物相种类及分布状况等都对其可磨性有影响, 情况如图 1-4 所示。首先, 煤中矿物质的可磨性与煤化程度无关, 而各煤岩组织的可磨性与煤化程度关系曲线均呈山峰状分布, 大致在可燃基挥发分为 20% 左右时, K_{HGI} 值最大, 最易磨碎。

3. 煤的磨损性

煤的磨损性主要取决于煤中原生的和混入的矿物质的种类和数量。磨煤机碾磨件的磨蚀属于磨粒磨损类型, 致磨粒子主要是石英和黄铁矿颗粒。石英和黄铁矿的莫氏硬度为 6~7, 非常高。煤磨损性定量测定是在专门的试验台架上进行的。我国电力行业使用冲击磨损试验台进行条件试验(电力行业标准 DL465—92《煤的冲刷磨损指数试验方法》)。国外常用按英国标准规定的测定方法, 即 YGP 指数法。

4. 煤机械粉碎后的粒度分布特征

煤经过机械粉碎后所形成的多分散粉粒体的粒度分布, 可以筛分曲线 $R_x = f(x)$ 表示, 见图 1-5。 $R_x(\%)$ 表示孔径为 x 的筛上余量, D_x 为通过量。筛分曲线可通过筛分试验得到。由于筛网孔径在大小两个方向上都有技术限制, 因而机械筛分方法不可能得到从粒径为零到极大的全筛分特性, 正如图 1-5 中曲线 1 的 ab 段($R_{40} \sim R_{200}$)所示。光衍射粒度特性分析仪便可以给出全特性。筛分曲线可直观表示煤粉粗细和均匀程度之分, 如图中的曲线 2 和 3。煤岩之类的脆性物料破碎碾磨后生成的粉粒体, 其粒度频度 $\left(\frac{dR_x}{dx}\right)$ 呈偏态分布, 如图 1-5a 所示。1933 年, Rosin-Rammler 提出一个拟合多分散粉粒体粒度分布特性的半经验性微分表达式, 即:

$$\frac{dR_x}{dx} = 100nbx^{n-1}e^{-bx^n} \quad (1-2)$$

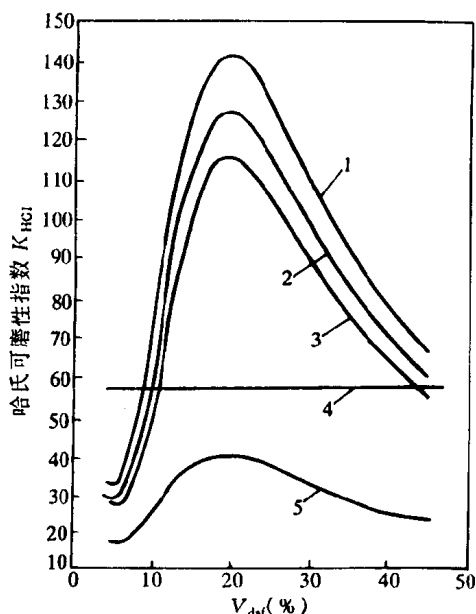


图 1-4 不同显微组分和矿物质的哈氏可磨性指数的关系(为计算所得的值)

1—丝质组; 2—半丝质体和假镜煤;
3—镜质组; 4—矿物质; 5—稳定组

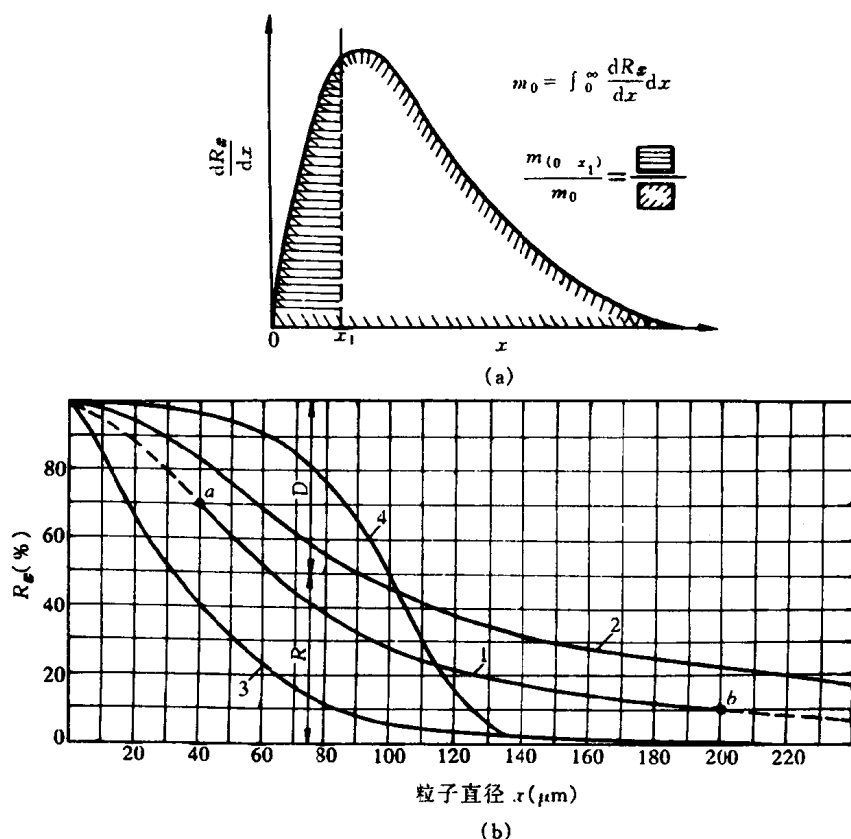


图 1-5 煤粉颗粒组成特性

积分后得到

$$R_x = 100e^{-bx^n} \quad (1-3)$$

该式的双对数形式为:

$$\lg \ln \left(\frac{100}{R_x} \right) = \lg b + n \lg x \quad (1-4)$$

这一形式表明,筛分特性在双对数坐标($\lg \ln R_x$ - $\lg x$)图上呈线性关系,其中, n 为斜率, b 实际上表示筛分特性线的横向截距。从物理意义上讲, n 为表示粒度均匀性的指数, b 是表示煤粉细度的系数。我国电力行业中,通常使用孔径为 $90\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$ 两个筛子作煤粉筛分特性测定用,即测知 R_{90} 、 R_{200} ,在双对数坐标图上给出代表全特性的直线(参见图 1-6,筛余量 R_x 是倒序标注的)。由式(1-4)可得:

$$n = \frac{\lg \ln \left(\frac{100}{R_{200}} \right) - \lg \ln \left(\frac{100}{R_{90}} \right)}{\lg \frac{200}{90}} \quad (1-5)$$

$$b = \frac{1}{90^n} \cdot \ln \frac{100}{R_{90}} \quad (1-6)$$

因此,代入两测值,即可掌握粒度分布的总体特征 n 和 b 。Rosin-Rammler 拟合的分布特性较好地涵盖了硬煤在各种粉磨方式下($n > 1$)的多分散粉粒体的实际筛分特性,因而广泛沿用

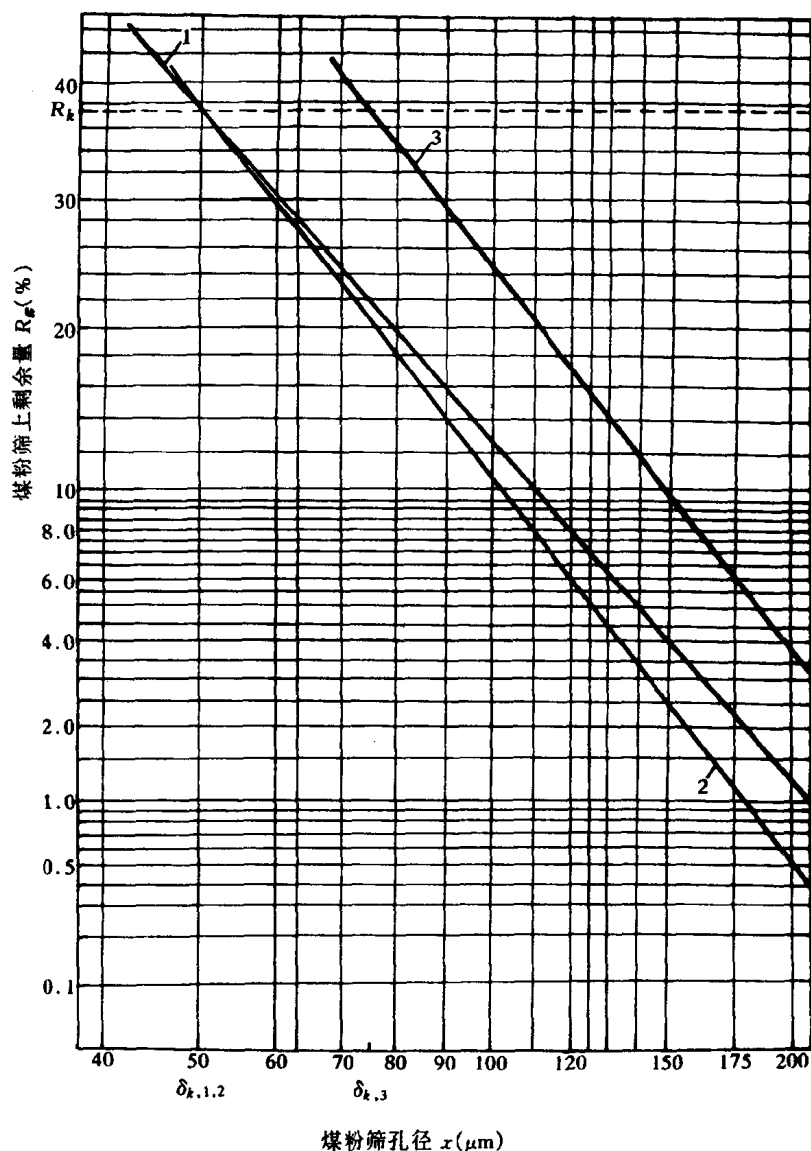


图 1-6 粉粒特性 $R_x = f(x)$ 关系曲线示例

至今。

式(1-2)实际上是不同粒度在煤粉分散体中所占比例与粒度大小关系的概率分布。当 $n > 1$ 时, x^{n-1} 增加; 而 e^{-bx^n} 减小, $\frac{dR_x}{dx} = f(x)$ 当存在极大值, 说明某一粒径的煤粉所占比例最大, 其物理意义即相应于粉粒体的调合平均粒径。该粒径为

$$x = 90 \sqrt[n]{\frac{n-1}{n \ln \frac{100}{R_{90}}}} (\mu\text{m}) \quad (1-7)$$

$n = 1$ 时, 对应的 R_x 最大值在 $x = 0$ 处, 表明大部分粒子偏布于直径接近于 0 处。当 $n < 1$ 且 $x \rightarrow 0$ 时, 微细组分煤粉的比表面积计算值偏高, 甚至会出现其趋于 ∞ 的情况。同时, 在 $n \leq 1$ 的两种情况中, 粉粒体中粗大组分仍占一定比例, 粒度分布很不均匀。工程实际中, 要求大粒径