

第9篇 目 录

9.1 燃料	9-5	一、费-托合成法	9-55
9.1.1 资源与储量	9-5	二、甲醇-汽油法	9-56
9.1.2 固体燃料	9-5	三、合成气-汽油法	9-57
一、煤	9-5	9.1.10 煤液化的经济	9-57
二、其他固体燃料	9-13	9.2 热的产生	9-58
9.1.3 液体燃料	9-15	9.2.1 燃烧化学计量学	9-58
一、液体石油燃料	9-15	一、燃烧需要的理论氧与空气	9-58
二、非石油液体燃料	9-22	二、燃烧所需的过剩空气	9-58
9.1.4 气体燃料	9-24	三、燃烧产物	9-62
一、天然气	9-24	9.2.2 燃烧产物的焓	9-63
二、液化天然气 (LNG)	9-26	9.2.3 固体燃料在炉排上与悬浮态下的 燃烧	9-63
三、液化石油气 (LPG)	9-26	一、燃料-床层燃烧	9-63
四、重整气	9-26	二、悬浮燃烧	9-65
五、油气	9-27	三、布煤机-炉排燃烧	9-67
六、发生炉气	9-27	四、磨粉机	9-68
七、兰水煤气、加碳水煤气与煤气	9-27	9.2.4 固体燃料在流化床中的燃烧	9-70
八、高炉气	9-27	一、常压与加压流化床 (AFBC与PFB C)	9-70
九、乙炔	9-27	二、AFBC工厂的设计	9-72
十、氢	9-27	三、流化设计因素	9-75
十一、硫杂质	9-27	四、AFBC设计方案	9-77
十二、天然气的过压缩性	9-27	9.2.5 液体燃料的燃烧	9-77
9.1.5 燃料与能的成本	9-28	一、液体燃料燃烧器	9-77
9.1.6 煤转化为液体与气体燃料以及作 为化工原料	9-30	二、燃烧结垢	9-79
9.1.7 煤的气化	9-31	9.2.6 气体燃料的燃烧	9-80
一、概述	9-31	一、气体燃烧器	9-80
二、理论考虑	9-31	二、低热值与中热值燃气的燃烧特性	9-83
三、现有气化设备的类型	9-33	三、低热值与中热值燃气的实验评价	9-85
四、发展与利用	9-36	9.2.7 电加热	9-85
五、煤气化的应用	9-39	一、直接电阻加热	9-85
六、气体的净化与精制	9-40	二、间接电阻加热	9-86
七、煤气化的经济	9-40	三、感应加热	9-88
9.1.8 煤的直接液化	9-41	四、介电加热	9-91
一、概述	9-41	五、微波加热	9-91
二、直接液化的动力学	9-42	六、电弧 (等离子体) 加热	9-92
三、直接液化过程	9-48	七、激光加热	9-93
四、煤热解过程	9-53	9.2.8 燃烧设备	9-94
9.1.9 煤的间接液化	9-55		

一、直接燃烧设备.....	9-94	9.3.3 联合生产	9-126
二、间接燃烧设备.....	9-95	一、定义与概述.....	9-126
三、现有加热炉节约燃料的方法.....	9-99	二、典型系统.....	9-127
9.2.9 蒸汽发生器	9-100	三、节能潜力.....	9-131
一、锅炉设计基础.....	9-101	四、代表性系统的联合生产性能.....	9-132
二、电站用蒸汽发生器.....	9-101	五、操作问题.....	9-135
三、工业锅炉.....	9-107	9.4 热的储蓄	9-138
四、影响性能的因素.....	9-110	一、格子砖蓄热器.....	9-138
五、烟道与烟囱.....	9-111	二、高炉热风炉.....	9-138
9.3 热的输送	9-114	三、平炉与玻璃熔池蓄热器.....	9-139
9.3.1 蒸汽系统	9-114	四、焦炉蓄热器.....	9-139
一、系统特性.....	9-114	五、碎石炉.....	9-140
二、水的组成.....	9-116	六、Ljungstrom加热器	9-140
9.3.2 传热液系统	9-117	七、其他系统.....	9-141

第9篇 能的利用、转化与储存

作者:

Richard c.corey 固体与气体燃料, 燃烧, 燃料与能的成本, 煤的转化, 燃烧
过程设备, 输热与蓄热, 本篇主编

Richard Barrett 蒸汽系统

Robert c.Amero 液体燃料, 燃烧

Harold F.Chambers, Jr, 煤的液化

Ezekail L.Clark 本篇副主编, 煤的气化

Neil H.Coates 流化床燃烧

Willard E.Fraize 联合生产

Yuan C.Fu 煤的液化

H.A.Grabowski 蒸汽发生器

Eugene Mezey 电加热

David E.Stutz 电加热

译者:

秦匡宗

zk456/2409)
zk449/0109

第9篇 目 录

9.1 燃料	9-5	一、费-托合成法	9-55
9.1.1 资源与储量	9-5	二、甲醇-汽油法	9-56
9.1.2 固体燃料	9-5	三、合成气-汽油法	9-57
一、煤	9-5	9.1.10 煤液化的经济	9-57
二、其他固体燃料	9-13	9.2 热的产生	9-58
9.1.3 液体燃料	9-15	9.2.1 燃烧化学计量学	9-58
一、液体石油燃料	9-15	一、燃烧需要的理论氧与空气	9-58
二、非石油液体燃料	9-22	二、燃烧所需的过剩空气	9-58
9.1.4 气体燃料	9-24	三、燃烧产物	9-62
一、天然气	9-24	9.2.2 燃烧产物的焓	9-63
二、液化天然气 (LNG)	9-26	9.2.3 固体燃料在炉排上与悬浮态下的 燃烧	9-63
三、液化石油气 (LPG)	9-26	一、燃料-床层燃烧	9-63
四、重整气	9-26	二、悬浮燃烧	9-65
五、油气	9-27	三、布煤机-炉排燃烧	9-67
六、发生炉气	9-27	四、磨粉机	9-68
七、兰水煤气、加碳水煤气与煤气	9-27	9.2.4 固体燃料在流化床中的燃烧	9-70
八、高炉气	9-27	一、常压与加压流化床 (AFBC与PFB C)	9-70
九、乙炔	9-27	二、AFBC工厂的设计	9-72
十、氢	9-27	三、流化设计因素	9-75
十一、硫杂质	9-27	四、AFBC设计方案	9-77
十二、天然气的过压缩性	9-27	9.2.5 液体燃料的燃烧	9-77
9.1.5 燃料与能的成本	9-28	一、液体燃料燃烧器	9-77
9.1.6 煤转化为液体与气体燃料以及作 为化工原料	9-30	二、燃烧结垢	9-79
9.1.7 煤的气化	9-31	9.2.6 气体燃料的燃烧	9-80
一、概述	9-31	一、气体燃烧器	9-80
二、理论考虑	9-31	二、低热值与中热值燃气的燃烧特性	9-83
三、现有气化设备的类型	9-33	三、低热值与中热值燃气的实验评价	9-85
四、发展与利用	9-36	9.2.7 电加热	9-85
五、煤气化的应用	9-39	一、直接电阻加热	9-85
六、气体的净化与精制	9-40	二、间接电阻加热	9-86
七、煤气化的经济	9-40	三、感应加热	9-88
9.1.8 煤的直接液化	9-41	四、介电加热	9-91
一、概述	9-41	五、微波加热	9-91
二、直接液化的动力学	9-42	六、电弧 (等离子体) 加热	9-92
三、直接液化过程	9-48	七、激光加热	9-93
四、煤热解过程	9-53	9.2.8 燃烧设备	9-94
9.1.9 煤的间接液化	9-55		

一、直接燃烧设备.....	9-94	9.3.3 联合生产	9-126
二、间接燃烧设备.....	9-95	一、定义与概述.....	9-126
三、现有加热炉节约燃料的方法.....	9-99	二、典型系统.....	9-127
9.2.9 蒸汽发生器	9-100	三、节能潜力.....	9-131
一、锅炉设计基础.....	9-101	四、代表性系统的联合生产性能.....	9-132
二、电站用蒸汽发生器.....	9-101	五、操作问题.....	9-135
三、工业锅炉.....	9-107	9.4 热的储蓄	9-138
四、影响性能的因素.....	9-110	一、格子砖蓄热器.....	9-138
五、烟道与烟囱.....	9-111	二、高炉热风炉.....	9-138
9.3 热的输送	9-114	三、平炉与玻璃熔池蓄热器.....	9-139
9.3.1 蒸汽系统	9-114	四、焦炉蓄热器.....	9-139
一、系统特性.....	9-114	五、碎石炉.....	9-140
二、水的组成.....	9-116	六、Ljungstrom加热器	9-140
9.3.2 传热液系统	9-117	七、其他系统.....	9-141

命名与单位

符号	定 义	国际标准单位	美国习用单位	符号	定 义	国际标准单位	美国习用单位
Ar	阿基米德数	无因次	无因次	P	输入功率	W/cm ²	W/in ²
D	直径	m	ft	P	电阻率	Ω·cm	Ω·ft
D	输入功率	J/s	Btu/h	Q	热值	J/kg	Btu/lb
d	厚度	cm	ft	Re	雷诺数	无因次	无因次
E	电场	V/cm	V/in	R	电力-热力比	无因次	无因次
g	重力加速度	m/s ²	ft/s ²	U	速度	m/s	ft/s
h	等焓焓	KJ/kg	Btu/lb	v	光速	cm/s	in/s
L	高度	m	ft	W	流量	kg/h	lb/h
P	压力	Pa	lbf/in ²	Z	过压缩因子		

希腊字母符号

e	空隙率	无因次	无因次	μ	比透磁性	无因次	无因次
η	热效率	无因次	无因次	ρ	密度	kg/m ³	lb/ft ³
μ	粘度	kg/(m·s)	lb/(ft·s)	φ	形状因子		

9.1 燃 料

9.1.1 资源与储量

美国主要化石燃料——煤、石油与天然气的资源与储量为：

10 ¹⁶ Btu			
燃 料	已知储量	潜在经济资源量	上限资源量
煤	4.8	3.0	25.0
石油液(原油与天然汽油)	0.26	2.7	14.0
天然气	0.30	2.1	4.5

换 算 系 数	
烟煤与无烟煤	30.2 J/kg (26 × 10 ⁶ Btu/t)
褐煤与次烟煤	23.2 J/kg (20 × 10 ⁶ Btu/t)
原油	38.4 J/l (5.8 × 10 ⁶ Btu/bbl)
天然气液	30.5 J/l (4.6 × 10 ⁶ Btu/bbl)
天然气	36 × 10 ¹⁰ J/m ³ (1032 Btu/ft ³)

$$1\text{bbl}=42\text{gal}=159\text{l}=0.159\text{m}^3$$

9.1.2 固 体 燃 料

一、煤

一般参考文献

Elliott(ed), *Chemistry of Coal Utilization*, 2d suppl vol, Wiley, New York, 1981 Van Krevelen, *Coal*, Elsevier, Amsterdam, 1961.

1. 起源

煤成因于树木、灌丛、蕨类、苔藓、藤蔓以及其他类型的植物残体的抑制腐败作用。这些植物在几百万年以前的炎热、潮湿、雨量充沛的漫长年代里，在巨大的湿地与沼泽中，滋长极为茂盛。煤的先质是泥炭，它是植物残体经微生物与化学作用而形成的。泥炭继续经受温度、压力以及其他物理作用而变质成为今天我们称为各种级别的煤。由于在这一过程中变质的程度不同，煤不是一种均一的物质，可以说，没有两种煤的各种性质是完全相同的。

2. 煤的分类

煤按照其变质程度不同，从褐煤直到无烟煤，作为一个系列，可以分为若干个煤级。表9-1是美国测试与材料学会采用的煤的分类系列D388-77。该分类法采用的基础指标是湿的无矿物质的煤的热值，以及干燥的无矿物质的煤的固定碳值。低级煤是根据热值J/kg (Btu/lb) 来分类的。煤的粘结性则作为相邻煤级间的区分指标。如果煤在测定挥发分时的残留

表 9-1 煤的按级分类①

级别	组 别	缩 写	固定碳, % (dmmf 基)		挥发分, % (dmmf 基)		热值, Btu/lb ^② (湿 ^③ mmf 基)		粘 结 性
			等于或大于	小于	大于	等于或小于	等于或大于	小 于	
无烟煤	超无烟煤	ma	98	—	—	2			不粘结
	无烟煤	an	92	98	2	8			
	半无烟煤 ^④	sa	86	92	8	14			
烟煤	低挥发分烟煤	lvb	78	86	14	22			一般不 粘结 ^⑥
	中挥发分烟煤	mvb	69	78	22	31			
	高挥发分烟煤 A	hvbA	—	69	31	—	14000 ^⑤		
	高挥发分烟煤 B	hvbB	—	—	—	—	13000 ^⑤	14000	
	高挥发分烟煤 C	hvbC	—	—	—	—	11500	13000	粘 结
							10500	11500	
次烟煤	次烟煤 A	SubA					10500	11500	不 粘 结
	次烟煤 B	SubB					9500	10500	
	次烟煤 C	SubC					8300	9500	
褐煤	褐煤 A	ligA					6300	8300	不 粘 结
	褐煤 B	ligB						6300	

①ASTM标准年鉴, 26部, D388-77, 1977。本分类不包括少数主要是非层状的变异煤, 它们的物理与化学性质特殊, 固定碳或热值范围在高挥发分烟煤与次烟煤之间。这些煤含固定碳小于48% (干的无矿物质基准), 或热值大于15500 Btu/lb (湿的无矿物质基准)。

②Btu/lb换算为J/kg时, 乘以2326。

③相当于煤的自然内在水分, 但不包括煤表面的可见水。

④如粘结时则划分为低挥发烟煤。

⑤煤的固定碳含量为69%或更多时 (干的无矿物质基准), 则按固定碳分类, 而不考虑其热值。

⑥此烟煤组中可能有不粘结煤, 在高挥发分C烟煤组中有很多例外。

焦块能承受500g的砝码而不碎, 或者焦块膨胀, 或者呈多孔细孔状结构, 则该煤即可认为具有粘结性。

Parr公式列如方程 (9-1) 至 (9-3), 它们的近似公式列如方程 (9-4) 与 (9-5), 均用于煤级的分类。Parr公式常用于燃料用煤的分类。

$$F' = \frac{100(F - 0.15S)}{100 - (M + 1.08A + 0.55S)} \quad (9-1)$$

$$V' = 100 - F' \quad (9-2)$$

$$Q' = \frac{100 - (Q - 50S)}{100 - (1.08A + 0.55S)} \quad (9-3)$$

$$F' = \frac{100F}{100 - (M + 1.1A + 0.1S)} \quad (9-4)$$

$$Q' = \frac{100Q}{100 - (1.1A + 0.1S)} \quad (9-5)$$

式中 M 、 F 、 A 与 S ——均为重量百分数, 湿基准, 相应为水分、固定碳、灰分与硫的含量;

F' 与 V' ——干的无矿物质 (dmmf) 基准的重量百分数, 相应为固定碳与挥发分的含量;

Q 与 Q' ——发热量, Btu/lb ($\times 2326 = \text{J/kg}$), 相应为湿的与湿的无矿物质 (mmf) 基准时的数值。

表 9-2 美国各州开采的主要煤级^①

州 名	无烟煤	半无烟煤	低挥发 分烟煤	中挥发 分烟煤	高挥发分 烟煤A	高挥发分 烟煤B	高挥发分 烟煤C	次烟煤 A	次烟煤 B	次烟煤 C	褐煤
Alabama				×	×						
Alaska						×	×	×	×	×	×
Arkansas		×	×	×	×						×
Colorado					×	×	×	×	×	×	×
Illinois					×	×	×				
Indiana						×	×				
Iowa							×				
Kansas					×	×					
Kentucky											
Eastern					×	×					
Western					×	×	×				
Maryland			×	×	×						
Missouri							×	×			
Montana						×	×	×	×	×	×
New Mexico					×	×	×		×		
North Dakota											×
Ohio					×	×	×				
Okalahoma			×	×	×	×	×				
Pennsylvania	×	×	×	×	×						×
South Dakota											×
Tennessee				×	×						×
Texas							×	×			×
Otah					×	×	×	×	×		
Virginia		×	×	×	×						
Washington					×	×	×		×		×
West Virginia			×	×	×						
Wyoming						×	×	×	×	×	

① 主要汇编自美国煤的代表性分析, U.S. Bur. Mines Bull, 446, 美国的煤资源 U.S. Geol. Survey Bull, 1136.

表9-2为美国各主要产煤州生产的主要煤级。

3. 煤的组成与热值

煤的组成常用工业分析与元素分析两种方法表示, 均为重量百分组成。工业分析按水分、挥发分、固定碳与灰分的规定方法测定。图9-1给出了各种级别煤的工业分析与热值(以湿的无矿物质基准表示)。由图可见, 固定碳与热值随着煤级的增高而增大, 水分与挥发分则随之而降低。

煤的总水分包括内在水分与自由水分*。内在水分即矿床与平衡水分, 是在煤田沉积自然状态下煤层的一种性质。自由水分或称表面水分, 是煤在标准状况下经空气干燥后总水分中失去的那部分水分。

挥发分是煤在隔绝空气及规定条件下受热后以气态或蒸汽逸出的部分。除少量吸附的甲烷外, 煤本身不存在挥发的部分, 挥发分是煤质受热后分解的结果。

固定碳是在挥发分逸出后的残留物。根据工业分析, 以100减去水分、挥发分与灰分, 即得固定碳。除碳以外, 它还可以含有百分之零点几的氢与氧, 百分之0.4至1.0的氮, 以及

* 原文为矿床水分, 为自由水分之误——译者

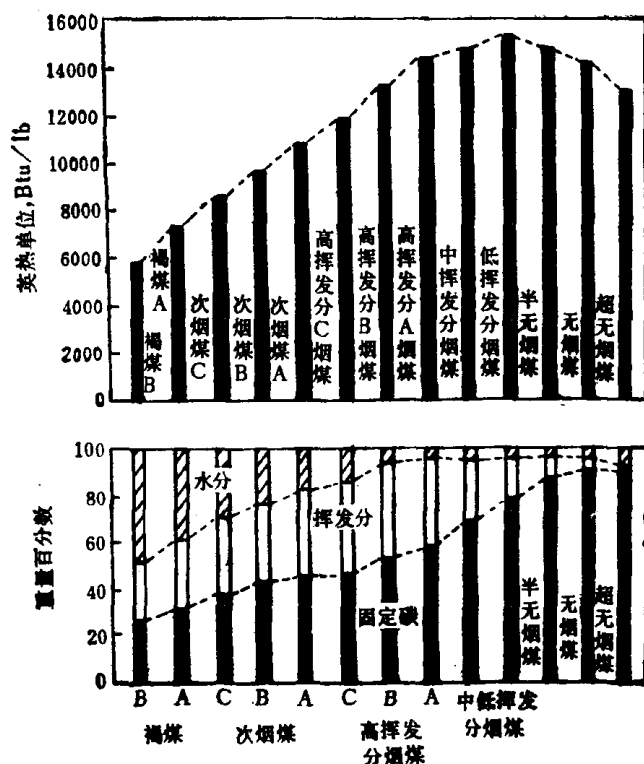


图 9-1 煤的热值与工业分析 (湿的无矿物质基准) Btu/lb 换算为 J/kg 时乘以 2326

煤中约一半的硫。

灰分是煤在规定条件下燃烧后的无机残留物。它主要由硅、铝、铁、钙以及少量镁、钠、钾和钛的化合物组成。灰分与原始矿物质可以有很大的不同，原始矿物质多为高岭石、伊利石、蒙脱石、石英、黄铁矿和石膏。

元素分析按规定方法可分别测得灰分、碳、氢、氮、氧 (减差) 和硫的含量，同时，也可测定煤的热值，以每公斤焦耳数表示之 (英制为每磅英热单位数)。它是在规定条件下将一定量的煤在氧弹量热仪中定容完全燃烧时所放出的热量。测定结果中如包括燃烧产物中水汽化潜热，称为粗热值或高热值 (HHV), Q_h ；不包括水的冷凝热的热值称为低热值 (LHV), Q_l 。两者的计算关系式为：

$$Q_l = Q_h - 1030W \quad (9-6)$$

式中 W ——每磅燃料生成水的磅数

1030 为定容燃烧时的高热值换算为定压燃烧时低热值的系数

对气体燃料而言，一个有用的公式是：

$$Q_l = Q_h - (859pv/T) \quad (9-6a)$$

式中 Q_l 与 $Q_h = \text{Btu/ft}^3$ 气体

p = 压力，汞柱

v = 燃烧产物中的水， ft^3/ft^3 燃料

T = 温度， $^{\circ}\text{R}$

在 60°F 与 29.92inHg 下，上式可简化为：

$$Q_l = Q_h - 49.4v \quad (9-6b)$$

根据燃气工艺研究院 (IGT) 提出的公式, Q_h 可以用以下的近似式估算 (Q_h 的单位为 Btu/lb, 换算为 J/kg 时乘以 2326),

$$Q_h = 146.58C + 568.78H + 29.4S - 6.58A - 51.53(O + N) \quad (9-7)$$

式中 e, H, S, A, O 与 N ——分别为碳, 氢, 硫, 灰分, 氧与氮的干基准重量百分含量。此式对 775 种煤的偏差值为 127。

煤的分析报告可以采用几种不同的基准, 根据应用需要而选取最适宜的基准表示之。收样基准为样品在实验室收到时的各组分的重量百分数, 样品本身可以是燃烧使用前的、开采后的或专用制备前的煤。无水 (干) 基准最为常用, 因为它便于根据使用时实际水分含量计算校正。无水无灰基准则常用于对煤级与煤资源的估测。例如一定煤源与煤级的煤, 以此基准计算时, 它们的热值很稳定。这些基准运用的比较可参见表 9-3。

表 9-3 煤分析时所用基准的比较
(高挥发分烟煤 A, Allegheny County, Pa, Pittsburgh 煤田)

基 准	工业分析, 重%				元 素 分 析, 重 % ^①					热值 Btu/lb
	水分	挥发分	固定碳	灰分	碳	氢	氧	氮	硫	
收样	2.4	36.6	53.2	7.8	75.8	5.1	8.2	1.5	1.6	13560
干	—	37.5	54.5	8.0	77.7	5.0	6.2	1.5	1.6	13890
干, 无灰	—	40.8	59.2	—	84.4	5.4	6.7	1.7	1.8	15100

① 对于收样基准, 氢与氧的含量包括水分中的氢与氧。(Btu/lb 换算为 J/kg 时乘以 2326)

工业分析与元素分析的实验室操作方法可参见 ASTM 标准年鉴, 26 部, 1977; 以及美国矿务局公报 638, 1967:《煤与焦炭的分析测试方法》。

4. 煤中的硫

煤在燃烧后要向大气释放氧化硫。为了减轻大气污染, 煤中的硫含量受到人们很大的关注。煤中的硫以三种形态存在: 黄铁矿硫 (FeS_2); 有机硫, 它是煤质的一部分, 以硫酸盐形式存在的硫。硫酸盐硫的含量一般仅为煤的百分之另点另几; 有机硫可为总硫量的百分之二十至八十, 由于有机硫以复杂的形式与煤质化学结合为一体, 要脱除这部分硫需要用深度处理的方法, 以破坏它的化学键。目前尚无已知的经济的方法可以脱除它, 但是所谓化学净化煤的方法正在不断取得进展; 黄铁矿硫可以用标准的洗煤的方法除去它的一部分, 它的脱除程度取决于煤的粒度以及黄铁矿的粒度与分布。

美国各地煤的含硫量高低不一相差悬殊, 以干基重量百分数计, 低的只有 0.2, 高的可达 7。根据硫含量的多少进行煤的划分, 美国现存的各种煤的储量如图 9-2 所示。关于美国煤的含硫量的详细资料, 可参见 U.S. Bureau of Mines Information Circular 8312。有关降低美国煤中硫的潜力, 可参阅 U.S. Bureau of Mines Information Circular 8118, 其中有 455 种原煤样的可洗性数据。

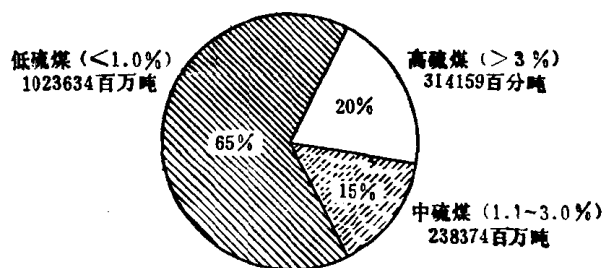


图 9-2 美国煤按含硫量区分的各级煤的估计存量

(1965 年 1 月 1 日, 据 U.S. Bureau of Mines Information Circular 8312)

5. 煤灰的性状与组成

煤在用作燃烧或气化时, 很重要的一点是要测定灰分的熔融性, 包括最初变形温度、软化温度与流动温度。软化温度与最初变形温度之差, 称为软化区间。流动温度与软化温度之差, 称为流动区间。煤灰的熔融性按ASTM D1857, ASTM年鉴, 26部, 1977所载的方法测定。为了定性地鉴定煤灰在炉排与炉内传热面上的性状, 是否会产生粘连或熔融的大块灰渣, 从而妨碍传热与气体流动, 最常用的粗略参考指标是灰分的软化温度。流动温度与流动区间则是用在熔渣炉中灰的“可流动性”的定性指标。然而实际上灰的熔融性不是一个十分可靠的参数, 因之在设计与操作中运用灰分的熔融性数据时要小心谨慎。在下述资料中对此问题有很有价值的讨论 (Steam, Its Generation and Use, Babcock & Wilcox Co., New York, 1978)。

煤灰组成的变化很大, 以氧化物计算, 其组成范围为 (重量百分数):

SiO ₂	20~60	MgO	0.3~4
Al ₂ O ₃	10~35	TiO ₂	0.5~2.5
Fe ₂ O ₃	5~35	Na ₂ O与K ₂ O	1~4
CaO	1~20	SO ₃	0.1~12

对于估计燃料床层内的结渣与结块, 预测在熔渣炉与旋风炉内煤灰渣的流动性 (U.S. Bur. of Mines Bull. 618), 以及初步估计煤粉炉内换热表面上的积垢与腐蚀, 煤灰组成都是有用的数据。

关于煤灰组成与熔融性的关系, 可参阅下述参考等: Coal Conversion Systems Technical Data Book, Part I A, U.S. Department of Energy, 1978。

对完全熔融的灰渣, 它的粘温关系式为:

$$\log \text{粘度} = 10^7 M / (T - 150)^2 + C \quad (9-8)$$

式中 粘度单位为泊 ($\times 0.1 = \text{Pa} \cdot \text{s}$)

$$M = 0.00835 (\text{SiO}_2) + 0.00601 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 0.109$$

$$C = 0.0415 (\text{SiO}_2) + 0.0192 (\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.0276 (\text{当量Fe}_2\text{O}_3) + 0.0160 (\text{CaO}) - 3.92$$

$T = ^\circ\text{C}$ 。括弧内的氧化物为它们的重量百分数, 此时 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} = 100$ 。

6. 煤的物理性质

自由膨胀指数 (FSI) 是煤在固定床或流化床中燃烧或气化时用以测定煤的膨胀性的指标。高膨胀指数的煤 (>4), 一般认为将在这些床层内操作时发生困难。具体的测试方法可参阅ASTM D720, ASTM标准年鉴, 26部, 1977; U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 3989。

Hardgrove可磨性指数 (HGI) 标志着磨煤时的难易程度, 而与煤的物理性质, 诸如硬度、脆性与韧性等直接有关。通常使用Hardgrove仪测定之 (参见ASTM D409)。此法选用一种标准煤样, 令它的可磨性为100 (参见第8篇), 以测定煤的相对可磨性与粉碎的难易程度。一些美国煤的FSI与HGI值列于表9-4。参见Bureau of Mines Information Circular 8205, 其中FSI有2812个煤样的数据, HGI有2339个煤样的数据。

堆积比重 已破碎煤的堆积比重, 根据煤的比重、颗粒分布、水分含量以及煤在堆积时的考塌陷程度而不同。下列不同级别煤的堆积比重的近似数据可供参:

块度稳定性反映了煤在运送与装船过程中的碎裂性质。它的测定方法是將22.7kg(50lb)的煤样在1.83m(6ft)高处向钢板上跌落两次,根据测试前后煤的颗粒分布,作为块度稳定性的百分指数(参见ASTMD440)。脆度试验是测定煤在反复运送过程中的破碎性。它实际

	lb/ft ³	kg/m ³
无烟煤	50~53	801~929
烟煤	42~57	673~913
褐煤	40~54	641~865

表 9-4 煤的自由膨胀指数与Hardgrove可磨性指数举例

州	煤田	自由膨胀指数(FSI)			Hardgrove可磨性指数(HGI)		
		高	低	平均	高	低	平均
Alabama	Mary Lee	8	1½	4	70	46	53
Illinois	No.6	6½	1	4½	66	52	60
Kentucky	Winifrede	4	2	3	47	43	45
Pennsylvania	Upper Kittanning	9	2½	8	111	58	96

上是块度稳定性的一种补充,是用标准的转鼓试验(ASTM D441-45)测定的。

干燥无灰的煤的比热数据如下(据Spiers:Technical Data on Fuels):

比热与水分含量以及比热与灰分含量之间均存在着线性关系。已知干燥的无灰基准煤的比热,可以校正换算到收样基准煤的比热。煤的比热与热焓的资料。可参见*Coal Conversion Systems Technical Data Book, Part IA, U. S. Department of Energy, 1978.*

	Btu/(lb.°F)	J/(Kg·K)
无烟煤	0.22~0.23	921~963
烟煤	0.24~0.26	1004~1088

在计算炉子、气化设备和其他用煤系统的热平衡时,煤的灰渣的平均比热可取下列数值:

温度范围		平均比热	
°C	°F	Btu/(lb.°F)	J/(Kg·K)
0~38	32~100	0.212	888
0~813	32~1500	0.224	938
0~1038	32~1900	0.232	971
0~1093	32~2000	0.235	984
0~1371	32~2500	0.272	1139

7. 焦

焦是煤、沥青、石油渣油和其他碳质物料经碳化后得到的固态、多孔、不溶性的残留物。从煤以外得到的焦,常在焦字之前冠以表示来源的词头,例如石油焦,也常冠以制造方法的词头,例如焦炉焦。

煤转化为焦 煤碳化时转化为焦的机理,是一个迄今尚未完全明了的复杂的物理与

化学现象。某些级别的或配合的煤料，在加热过程中发生一些相互关联的物理变化，有软化、脱挥发物、膨胀与再次固化等；相伴发生的一些化学变化有裂解、解聚、聚合与缩合等。详细的理论研究可参见Van Krevelen著的*Coal* (Elsevier, Amsterdam, 1961) 与Lowry主编的*Chemistry of Coal Utilization* (Wiley, New York, 1945 and 1963) 等专著。

高温焦 (900~1150℃) 美国这种焦用得最多。约有20%的烟煤，是供制造高温焦作冶金之用。约有99%的高温焦是在可回收副产品的焦炉中生产的，其余的是在蜂巢式或其他型式炉子中生产的。约有90%的高温焦炭用于高炉，其余的用于铸造和煤气厂。

美国矿务局在对占美国生产量30%的十二个高炉冶金焦厂的调查报告中，提供了有关高温焦炭化学与物理性质的极有价值的资料。这些性质的范围列如表9-5。

表 9-5 美国用的高温焦的化学与物理性质①

性 质	范 围	性 质	范 围
挥发分	0.6~1.4重%(收样时)	稳定指数	39~58 (1 in转鼓)
灰分	7.5~10.7重%(收样时)	硬度指数	60~68 (1/4in转鼓)
硫	0.6~1.1重%(收样时)	视比重(水=1.0)	0.80~0.99

① *Comparison of Properties of Coke Produced by BM-AGA and Industrial Methods*, U. S. Bur. Mines Rep. Invest, 6354. in换算为cm时，乘以2.54。

每吨干煤在内壁温度为1000~1150℃ (1832~2102°F) 的焦炉内高温碳化时，其产物产率通常约为：焦，653kg；气体，154kg (11,200ft³)；焦油，44kg (10gal)；水，38kg；轻油，11kg (3.3gal)；氨，2.2kg。

铸造焦 这种焦的要求与高炉用焦不同，它的挥发分不应超过2.0%，含硫不应超过0.7%，灰分不应超过12%，块度应大于3in。

低温与中温焦 (500~700℃) 这种焦目前在美国不大量生产。但是作为石油与天然气资源的一种补充，能同时得到液体与气体烃类的低温干馏工艺近来正日益引起人们的注意。

Fischer试验仪是一种测定低温干馏产物产率的一种约定的但是准确的试验方法。将已知重量的煤样，在规定的升温速度下隔绝空气加热至500℃，产物收集后分别称重。表9-6给出了各级煤的产物产率。

表 9-6 不同级别煤的Fischer试验产率 (收样基准)

ASTM 按 级 分 类		焦重%	焦油gal/t	轻油gal/t	气体ft ³ /t	水重%
煤级	煤 组					
烟煤	1.低挥发分烟煤	90	8.6	1.0	1760	3
	2.中挥发分烟煤	83	18.9	1.7	1940	4
	3.高挥发分烟煤A	76	30.9	2.3	1970	6
	4.高挥发分烟煤B	70	30.3	2.2	2010	11
	5.高挥发分烟煤C	67	27.0	1.9	1800	16
次烟煤	1.次烟煤A	59	20.5	1.7	2660	23
	2.次烟煤B	58	15.4	1.3	2260	28
褐煤	1.褐煤A	37	15.2	1.2	2100	44

注：gal/t换算为l/kg，乘以0.004；ft³/t换算为m³/kg，乘以3.1×10⁻⁵。

沥青焦与石油焦 沥青焦是用煤焦油沥青制成的，石油焦是用石油炼制时的渣油制成的。沥青焦约含有1.0%的挥发分，1.0%的灰分，小于0.5%的硫（收样基准）。石油焦有两种即延迟焦与流化焦。由于它们包含了原料油中的杂质，含硫量通常比较高，并可能含有相当多的钒盐。其组成与性质的范围如下：

组成与性质	延迟焦	流化焦
挥发分,重%	8~18	3.7~7.0
灰分,重%	0.05~1.6	0.1~2.8
硫,重%	—	1.5~10.0
可磨性指数	40~60	20~30
真比重,g/ml	1.28~1.42	1.5~1.6

二、其他固体燃料

1. 炭

炭是从固体碳质物料加热处理后得到的不粘结不熔融的残留物。煤在低温干馏或其他将煤转化为液体与气体燃料与化学品的过程中生成的炭是一种联产物，它具有相当高的热值。各种转化过程净产的炭量相差很大，有的过程可以为进料煤重的百分之三十至五十五，而有的则没有多余的可净得的炭，即所产的炭全部作了本厂的自用燃料。表9-7列出了两种煤转化过程的原料煤与所产炭的分析数据，与原料煤相比，炭的挥发分、硫含量与热值均较低，而灰分则稍高。

表 9-7 不同煤转化过程原料煤与产物炭的分析举例①

过 程	FMC③				IGT④	
	Pittsburgh-Federal		Illinois No.6		Pittsburgh	
	煤,干基	炭,干基	煤,干基	炭,干基	煤,干基	炭,干基
分析,重%						
挥发分	36.8	3.7	38.6	3.5	32.7	1.2
固定碳	57.0	86.8	50.0	76.4	52.3	77.5
灰分	6.2	9.5	11.4	20.1	14.1	21.3
硫	2.9	1.9	3.8	3.1	4.3	1.7
热值, Btu/lb②	14470	13400	12600	11870	13200	12200

① 据Nelson et al, *Study of the Identification of Potential Markets for Chars from Various Processing Systems*, Battelle Memorial Institute, Columbus.

② Btu/lb转换为J/kg时，乘以2326

③ FMC过程包括煤的多股流化干馏，以生产液体、气体、炭等产品。

④ IGT过程包括煤的加氢气化以生产管道煤气（约1000Btu/ft³）与炭。

2. 木材

木材中热值较高的是烘干硬木 $20004 \times 10^3 \text{ J/kg}$ 及烘干软木是 $20930 \times 10^3 \text{ J/kg}$ 。这些数字供一般工程应用时已足够精确。如需要以体积为基准的数据，在U.S.Department of Agriculture Handbook(1972再版本)一书中可查到各种主要硬木与软木的比重。

3. 泥炭

泥炭是积聚于水下或在水饱和的环境中经过部分分解后的植物质。它是煤的先质，但不列作煤的一种。泥炭目前在美国主要用于园艺及农业，以苔草炭（moss peat）的名称出售。

但在某些生产地区,用泥炭作为当地燃料的兴趣正在增加。虽然泥炭的分析数据差别很大,典型的优质泥炭含水约90%,固定碳3%,挥发分5%,灰分1.5%,硫0.1%。干基热值约为 $20930 \times 10^3 \text{J/kg}$ (9000Btu/lb)。

4. 木炭

木炭是木材干馏后的产物。它易吸水,常含水达10%~15%此外,尚含有灰分2~3%,氢0.5~1.0%。其热值约为 $27912 \times 10^3 \text{J/kg} \sim 30238 \times 10^3 \text{J/kg}$ (12000至13000Btu/lb)。

5. 树皮鞣渣

树皮作为鞣料后的残留物为树皮鞣渣。它常含水60%~70%。热值为 $5815 \times 10^3 \sim 6978 \times 10^3 \text{J/kg}$ (2500~3000Btu/lb)。

6. 蔗渣

蔗渣是甘蔗压榨蔗汁后的固体残留物。它通常含水40%~50%,热值为 $18608 \times 10^3 \sim 20934 \times 10^3 \text{J/kg}$ (8000~9000Btu/lb)。

7. 固体废料与生物质

每一人口产生不断增长的大量的固体废料,是发达社会的重要特征之一。在美国,这个数字已超过每人每天5磅,或每年约两亿吨,且增长迅速。表9-8列出了不同品种固体废料的组成。均以无水基准计算的,品种繁杂的废料,其组成竟是相当一致的。但是它们的大小与所含的水分不同,这是如何有效与经济地处理它们时的主要难题。

表 9-8 废物燃料的分析①

废 料 类 型	热 值 Btu/lb	重 量 百 分 组 成					密 度 lb/ft
		挥 发 分	水 分	灰 分	硫	干 可 燃 分	
纸	7572	84.6	10.2	6.0	0.20		
木料	8613	84.9	20.0	1.0	0.05		
碎布	7652	93.6	10.0	2.5	0.13		
食物下脚料	8484	53.3	72.0	16.0	0.52		
涂胶织物	10996	81.2	1.04	21.2	0.79	78.80	23.9
涂塑毡	11054	80.87	1.50	11.39	0.80	88.61	10.7
涂塑织物	8899	81.06	1.48	6.33	0.02	93.67	10.1
聚乙烯膜	19161	99.02	0.15	1.49	0	98.51	5.7
泡沫碎料	12283	75.73	9.72	25.30	1.41	74.70	9.1
树脂涂层玻璃,胶带	7907	15.08	0.51	56.73	0.02	43.27	9.5
尼龙织物	13202	100.00	1.72	0.13	0	99.87	6.4
乙烯基碎料	11428	75.06	0.56	4.56	0.02	95.44	23.4

①据Hescheles, "MECAR Conference on Waste Disposal, "New York, 1968; "Refuse Collection Practice", 3rd.ed., American Public Works Association, Chicago, 1966
(Btu/lb换算为J/kg乘以2326; lb/ft³换算为kg/m³, 乘以16.02)

大部分固体废料在作为燃料时,其热值是以自给燃烧,只留下不能燃烧的残渣,使废料在最后送至垃圾充填场时仅为原体积的10%~15%。废料燃烧时的热量是可以回收利用,但有时由于回收热量的设备费用高,或由于与某一合适的用热单位距离太远,会使热量回收在经济上不一定合算。

生物质(例如作物残渣或牲口粪)是目前正在研究它的工程适用性与经济性的一种重要能源。推荐参考书: D. J. DeRenzo, 《Energy from Bioconversion of Waste Materials》(Noyes Data Corp., Park Ridge, N. J. 1977)。

8. 煤油浆 (COM)

COM作为扩大国内燃料供应来源与减少国外石油进口的一种近期方法，其概念中最有吸引力之点在于这种制造与燃烧煤油浆的工艺是现成的，无需作多大的改动，即可在现有的许多锅炉中燃用。

制备煤油浆用的煤先干磨或湿磨至约有80%通过200号筛目，然后加入油与表面活性剂，它可以帮助煤粒处于悬浮状态。锅炉试验表明，当混合物中煤的重量为百分之五十时，COM可以在原设计为烧油与烧气的锅炉和一些燃烧设备中燃用，而无明显的效率降低，也无需昂贵的改建工程。一般认为，当锅炉的蒸汽产量小于45360kg/h (100000lb/h) 时，燃用COM是不太经济的。

COM属于假塑性非牛顿流体，亦即它的粘度随着速度梯度增加而降低。一旦COM开始流动，它的粘度接近于重油。

有关COM的有参考价值的资料：J. W. Eberle and R. H. Hickman, 《Can Coal-Oil Mixture Make It as Industrial Fuels?》(Mech. Eng., 24—28, March, 1978)。

9.1.3 液体燃料

一、液体石油燃料

主要的各种液体燃料，都是从石油原油分馏制成的。石油原油是烃类及其衍生物的混合物，包括从甲烷到重质沥青。原油中多达 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 的分子中，可能含有硫原子，有的含有氮、氧、钒、镍和砷。在作为燃料调合与出售之前，可以对选定的馏分油进行脱硫、加氢、裂解（使分子量降低）以及其他各种炼制过程。常用燃料的粘度-重度-馏程之间的关系如图9-3所示。

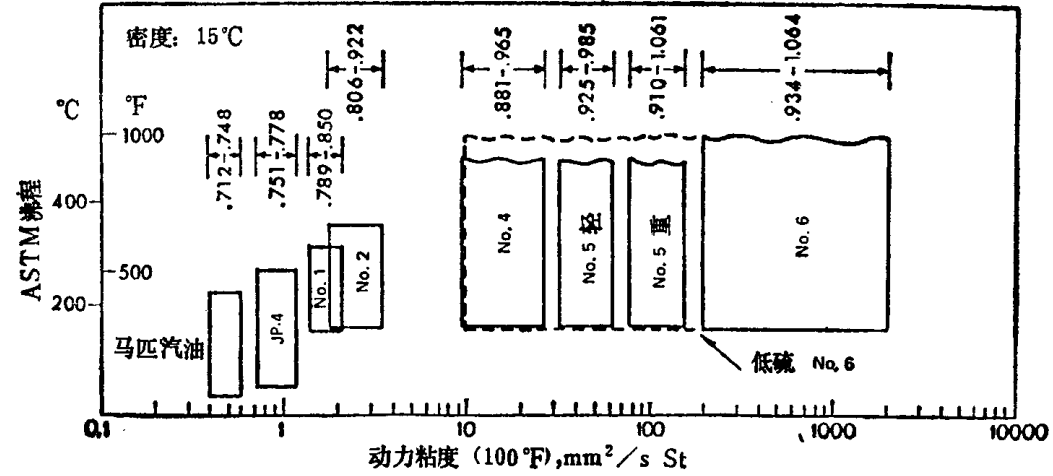


图 9-3 石油燃料的粘度、馏程与重度的关系

从油砂中经过萃取得到的高粘油也是石油原油的一种，它可以通过加氢和炼制，加工成为通常的石油产品。

1. 规格

美国测试与材料协会 (ASTM) 制定的各种规格，广泛用于各种燃料的分类。表9-9为