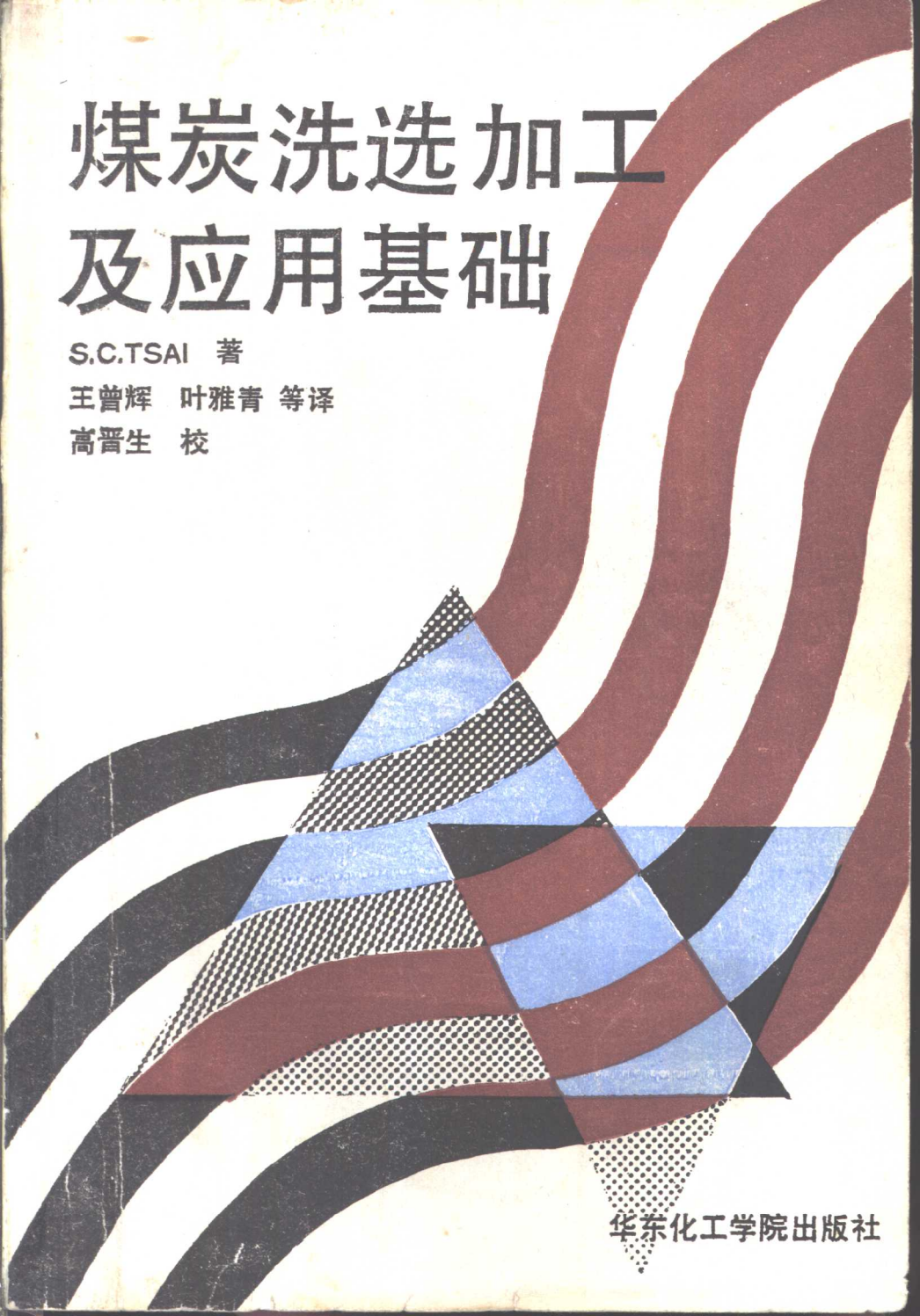


煤炭洗选加工 及应用基础

S.C.TSAI 著

王曾辉 叶雅青 等译

高晋生 校



华东化工学院出版社

T 1192
W-179

78520.11

煤炭洗选加工及应用基础

S.C.TSAI 著
王曾辉 叶雅青 等译
高晋生 校

华东化工学院出版社

710535

责任编辑 袁明辉

责任校对 盛 红

煤炭洗选加工及应用基础

Meitan Xixuan Jiagong ji Yingyong Jichu

S.C.TSAI 著

王曾辉 叶雅青 等译

高晋生 校

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

江苏吴江伟业印刷厂排版

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 12 字数 321 千字

1991 年 5 月第 1 版 1991 年 5 月第 1 次印刷

印数 1-3000 册

ISBN 7-5628-0111-8/TQ·12 定价 3.70 元

内 容 提 要

随着工农业生产的发展,对煤的需求量愈来愈大,又要求它对环境的污染最小,这就需要深刻了解煤的洗选和利用原理及洗选技术的状况。本书着重讨论选煤和其原理,包括:1)选煤的基本原理和对选煤技术的简要评价及发展方向;2)煤炭利用基本原理;3)煤的基本结构和特性对选煤和应用的影响;4)选煤和利用之间的内在联系。还讨论了煤的某些特性,如硫、矿物质和惰性组分的存在所引起的问题及其解决的途径。

本书可作为大专院校煤炭开采、煤化工、热工等专业教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

译 序

我国煤炭资源十分丰富。煤是我国主要能源和化工原料。目前煤占总能源消耗的四分之三，化工原料的二分之一。尽管煤对经济建设和人民生活有着如此密切的关系，各国煤化学家长期付出了艰巨的劳动，但遗憾的是人们对煤的本质的认识还是十分肤浅的。为了有效地利用煤炭资源，必须对煤的本质作深入的探讨。煤在利用过程中常常对环境造成不同程度的污染，煤中矿物质和有害成分常常限制了煤的应用。因此，选煤、制取低硫、低灰的超精煤也是经济建设中迫切需要解决的问题。我们向大家推荐这本论著的目的就在于有利于上述两个问题的研究和讨论。

本书作者从事煤和油页岩等含碳物质的精选、转化的研究与开发，并在油页岩加工、煤的液化、地下气化及煤的脱硫等方面获十项专利。本书概括了煤化学及工艺方面最新研究和技术开发成果，理论探讨和实际应用紧密结合。书中图表、工艺数据较多，具有一定的实用参考价值。

本书是一本煤炭科学和工程方面的有价值专著，也是煤化工专业的一本较好的教学参考书。

本书由王曾辉、叶雅青、高晋生、沈瑞祥翻译，并由高晋生审校。

由于水平有限，不妥和错误之处恳请广大读者指正。

译者

序 言

1973年以后的石油危机使人们普遍认识到石油资源即将枯竭，因而煤在美国能源供应中的重要性明显提高。同时，政府的法规强制进行空气和水的净化，条例也越来越严格。煤的用量增加而对环境的污染又要最小，这就需要深刻地了解煤的洗选和利用原理以及洗选技术的状况。由于后者已在其他书中论述，故本书重点讨论选煤和利用原理，它包括以下四个方面：

- 1) 选煤的基本原理和对选煤技术的简要评述。
- 2) 煤炭利用基本原理。
- 3) 煤的基本结构和特性对选煤和应用的影响。
- 4) 选煤和利用之间的内在联系。

本书不仅介绍煤的洗选和利用，而且简要评述了这一领域的现状和今后的发展方向。讨论了煤利用时，煤的某些特性，硫、矿物质和惰性组分的存在所引起的问题以及解决这些问题的可能性。因此，这本书是有价值的。它不仅适用于从事煤洗选及利用中的初学者和熟练工人，更适用于从事煤的研究和开发的高年级学生和研究生。

本书从煤的洗选和利用的基本原理的深入讨论开始，在需要之处加上应用的例子。1(章)讨论物理结构，2(章)论述从固体煤及煤衍生物的光谱和化学性质推断出煤的化学结构。3(章)讨论煤的性质对燃烧、热解、干馏、地面及地下气化、液化时的影响。这些特性是由煤的组成(或物理性质)所决定的。具有选择性特点的某些组成对特定的应用能获得更好的结果。因此，煤的洗选目的除了由于环保的需要外，可制备特定用途的煤。煤组成的洗选是以4(章)中讨论的煤的特性为基础的。5(章)讨论了煤中硫的结构和导致脱硫的硫官能团反应。

洗煤厂的基本单元操作是破碎和洗煤。破碎主要是除去不需要的化合物如煤质中的矿物质。大于0.635mm的级分在粗煤洗

选机如重介质洗煤机和跳汰机中被精制。0.635mm×28目的级分在粉煤洗选机如重介质旋流器、摇床、Batac跳汰机和水力旋流器中精制。小于28目的级分则用泡沫浮选法精制。除泡沫浮选法外，常规的洗选技术在6(章)中讨论。讨论的重点是操作原理及影响效率的因素。在煤的精制中，泡沫浮选是非常重要的工业技术。它和煤的其他物理精选如油凝胶化和磁分离放在7(章)中讨论。8(章)讨论煤的化学精选。所有的物理精选都能除去黄铁矿硫，但不能除去煤中有机硫。黄铁矿硫除去的百分率受到煤破碎后黄铁矿脱除程度的限制。因此，在合理的煤回收率情况下，含粉状黄铁矿煤的脱硫百分率是低的。在这种情况下，化学精制有可能具有高效率除去黄铁矿硫及高的煤的回收率的优点。许多化学精制过程(虽然至今仍在试验阶段)将能有效地除去有机硫。

作者

目 录

1 煤的物理结构

1.1 引言	1
1.2 分类	2
1.2.1 煤化程度分类	2
1.2.2 岩相分类	4
1.3 物理实体	5
1.3.1 煤的显微组分	5
1.3.2 孔隙	13
1.3.3 煤中矿物质	16
1.4 小结	30
参考文献	31

2 煤的化学结构和化学反应

2.1 引言	35
2.2 光谱特性	36
2.2.1 X-射线衍射谱	36
2.2.2 质谱	37
2.2.3 红外光谱(IR)	40
2.2.4 核磁共振谱(NMR)	42
2.2.5 电子自旋共振谱(ESR)	45
2.3 化学性质	47
2.3.1 用烷基卤化物和烯烃进行煤的烷基化反应	47
2.3.2 煤的酰基化	49
2.3.3 芳香族的互换(煤作为烷基化剂)	50
2.3.4 还原烷基化和质子化作用	56
2.3.5 氧化	60
2.3.6 水解	70
2.3.7 煤的液化	71
2.3.8 热解	84

2.4 基本单元和官能团的特性	87
2.4.1 缩合芳香层	87
2.4.2 脂肪烃和脂环烃中介结构和桥键基团	87
2.4.3 杂原子中介结构和桥键基团	88
2.5 小结	91
参考文献	92
3 煤的应用特性	
3.1 引言	100
3.2 煤的燃烧	101
3.2.1 煤燃烧的本质和应用	101
3.2.2 焦燃烧的化学反应和机理	101
3.2.3 燃烧方式	103
3.2.4 影响煤燃烧的特性	107
3.3 煤的干馏和热解	113
3.3.1 煤干馏的实质和分类	113
3.3.2 挥发分的组成和来源	114
3.3.3 煤热解速率和产率	115
3.3.4 影响煤干馏的特性	118
3.3.5 配煤	125
3.4 煤的气化	126
3.4.1 煤气化的本质和分类	126
3.4.2 煤气化的基本的化学反应	127
3.4.3 煤气化反应的动力学和机理	129
3.4.4 煤气化方法的分类	133
3.4.5 煤气化方法举例	135
3.4.6 对气化有影响的煤的性质	139
3.5 煤的地下气化(UCG)	142
3.5.1 地下气化的基本原理	143
3.5.2 煤的性质对地下气化的影响	145
3.5.3 通道	149
3.5.4 空气氧化增加烟煤的透气性和降低膨胀性	152
3.6 煤的液化	154

3.6.1 煤液化的本质和基本原理	154
3.6.2 煤液化时氢的传递	155
3.6.3 影响液化煤的性质	157
3.7 小结	163
参考文献	165
4 煤的洗选特性	
4.1 引言	173
4.2 比重	173
4.2.1 定义	173
4.2.2 影响比重的因素	174
4.2.3 应用	179
4.3 可磨性和脆性	179
4.3.1 定义和测定方法	179
4.3.2 可磨性和脆性的关系	181
4.3.3 影响可磨性的因素	182
4.3.4 应用	185
4.4 磁性	189
4.4.1 磁化强度与磁化系数	189
4.4.2 磁化强度的提高	192
4.5 表面性质	196
4.5.1 界面现象和浮选理论	197
4.5.2 影响浮选的因素	205
4.5.3 煤和煤中矿物质的浮选	210
4.6 小结	212
参考文献	214
5 煤中的硫及与脱硫有关的硫化物的反应	
5.1 引言	219
5.2 煤中硫的形态	219
5.2.1 无机硫	219
5.2.2 有机硫	220
5.2.3 美国煤的有机硫和黄铁矿硫的分布	220
5.3 煤中硫化物的形成	223

5.4 硫的分析方法	225
5.4.1 化学方法	225
5.4.2 仪器法	227
5.5 用物理方法分离黄铁矿	229
5.6 黄铁矿的化学反应	229
5.6.1 气体脱硫	229
5.6.2 溶液中氧化脱硫	240
5.7 煤中有机含硫官能团的结构	244
5.7.1 煤中硫与氧的比较	244
5.7.2 噻吩的分子结构	245
5.7.3 二苯并噻吩及其氧化物的分子结构	246
5.8 煤中有机含硫官能团的反应	248
5.8.1 单质硫的反应	248
5.8.2 硫醇的反应	250
5.8.3 二硫化物(RSSR')的反应	252
5.8.4 硫化物和硫醚的反应	253
5.8.5 噻吩化合物和缩合的噻吩化合物的反应	259
5.9 小结	268
参考文献	269
6 煤的洗选	
6.1 引言	278
6.2 洗选机的评价标准	279
6.2.1 相关标准	279
6.2.2 独立标准	280
6.3 重介质分选	281
6.3.1 磁铁矿法	281
6.3.2 重介质分选机的种类	285
6.4 水力分选	301
6.4.1 跳汰机	301
6.4.2 湿式富集摇床	310
6.4.3 Humphreys 螺旋选煤机	315

6.5 小结	318
参考文献	319
7 粉煤的物理分选	
7.1 引言	322
7.2 泡沫浮洗	322
7.2.1 泡沫浮选机类型	323
7.2.2 单级连续泡沫浮选	323
7.2.3 二级泡沫浮选	323
7.2.4 影响煤浮选的因素	325
7.2.5 浮选与浮沉分离的比较	330
7.3 油团聚	331
7.3.1 分离原理	331
7.3.2 应用	332
7.3.3 影响洗选效率和选择性的因素	333
7.3.4 与其他洗选方法的比较	335
7.4 磁力分离	337
7.4.1 磁性化分离法	338
7.4.2 高梯度磁力分离法	341
7.4.3 与泡沫浮选的比较	343
7.5 干法分选	344
7.5.1 分离原理	344
7.5.2 分选效率和与浮沉试验的比较	347
7.6 小结	347
参考文献	348
8 粉煤的化学脱硫	
8.1 引言	351
8.2 湿法脱硫	352
8.2.1 碱浸出法	352
8.2.2 Meyers 法	355
8.2.3 氧化脱硫法	357
8.2.4 氯解法	359
8.2.5 KVB 法	360

8.2.6 微波脱硫	360
8.3 化学破碎	362
8.3.1 化学破碎的原理和影响因素	362
8.3.2 与机械粉碎的比较	364
8.4 小结	365
参考文献	366

1 煤的物理结构

1.1 引言

煤是一种物理性能不均一而化学性质又很复杂的固体。它的反应性不仅决定于它的化学结构，也决定于它的物理结构。煤的化学结构将在2(章)中讨论。本章只讨论煤的物理结构，尤其着重说明煤的物理本质即煤的显微组分、孔隙和矿物质。由于煤的化学和物理结构随煤化程度而变化，所以本章还将讨论煤的煤化程度分类。

煤的煤化程度和煤岩显微组成在煤的化学反应中起着关键的作用。煤化程度对煤的反应性的影响是很明显的，因为煤化程度分类指标——即碳的百分含量也表征了煤的化学结构特点(见2(章))。随着煤化程度增高，芳香层片所占的比例及其大小也随之增大，定向排列更加规则化，煤的反射率相应地增加而反应性降低。煤化程度对焦化、气化和液化反应性的具体影响将在3(章)中详细讨论。

描述煤的物理本质是很有必要的。这是因为它在煤的转化过程中起着重要的作用。煤的显微组分通常分为壳质组、镜质组、微粒体和丝质体。这些显微组分的物理性质和化学性质各不相同，它们对焦化、气化和液化的影响也将在3(章)中讨论。一般来说，在焦化和液化时镜质组、壳质组的反应性较高，微粒体较差，丝质体是惰性的，而煤的显微组分对煤的气化影响较小。

孔隙按尺寸大小分为大孔、中孔和微孔。煤的孔隙率或内表面积随煤的煤化程度和显微组分的组成而变化。孔隙率或内表面积和它对反应试剂的“可接近性”可影响反应速度和反应产物的性质。矿物质在燃烧时转化为灰分，它必须清除掉，以免沾污锅炉。矿物质的成分决定了除灰的方式，如干法排灰或液态排渣。有些

矿物质对煤的气化和液化有催化作用。

1.2 分 类

煤按煤化程度和煤岩组成进行分类。煤岩学的分类与不同来源的煤的成分有关，而煤种的分类是基于煤化程度。煤化过程是一个由原始植物降解和不断演变，最终生成碳和石墨结构的过程。成煤物质本身来源于植物的不同部分。它们是很不均匀的，这种不均一性由于成煤过程中无机沉积物的混入而变得更大。物理性质和化学性质的不同是岩相分类的基础。显然，岩相分类是建立在物理特性变化的基础上的，而这些变化是由原始物质不同部分的降解产生的。相反，煤化程度的分类是基于在煤化过程中煤的总体上的成熟程度。

1.2.1 煤化程度分类

煤分为褐煤、次烟煤、烟煤和无烟煤。煤化程度分类是基于煤物质不断演变成纯碳结构的程度。因此，煤的含碳百分比是分类的基本参数或指标。尽管如此，美国材料试验学会(ASTM)在煤化程度分类中对高煤化程度煤则是根据挥发分的百分比(%),而对低煤化程度的煤则根据其发热量。表 1.1 列出了各种牌号煤的碳含量和挥发分含量(干燥无灰基)、发热量、水分含量以及不同煤的油浸反射率^[1]作为参考。由于挥发分数量主要决定于脱挥发分的条件，所以挥发分含量的测定条件已经标准化^[2]。标准的方法是把已称重的样品放在带盖的坩锅中，以 100℃/min 速度升温到大约 950℃，在此温度下停留 6min。

煤岩学中，煤的牌号用镜质组的反射率来衡量，因为镜质组是含量最多的一组显微组分。煤化程度提高，镜质组反射率也增加。镜质组的平均反射率从 0.26% 增加到 6.09%。反射率每升高 0.1% 称作一个 V 阶(V-Step)。

表 1.1 不同煤化程度的煤的性质^[1]

煤化程度①	挥发分 wt% of maf②	碳含量 wt% of maf	热值 J/kg × 10 ⁶ mmmf③	水分 wt%	油镜反射率 %
Lignite	69~44	76~62	19.09~14.49	52~30	0.25~0.4
Sub	52~40	80~71	26.45~19.09	30~12	0.4~0.65
HvBb HvCb]	50~29	86~76	29.90~24.15	15~2	0.4~0.75
HvAb	49~31	88~78	>32.20	5~1	0.75~1.1
Lvb	22~14	] 91~86]	—	5~1	1.1~2.0
Mvb	31~22				
Anthracite	14~2	99~91	—	—	>2.1

- ① lignite 褐煤
 Sub 次烟煤
 HvBb 高挥发分烟煤 B
 HvCb 高挥发分烟煤 C
 HvAb 高挥发分烟煤 A
 Lvb 低挥发分烟煤
 Mvb 中挥发分烟煤
 Anthracite 无烟煤
 ② maf 干燥无灰基
 ③ mmmf 干燥无矿物质基

1.2.2 岩相分类

(1) 煤的显微组分

1920年 Thiessen 用显微镜把煤的组成为镜煤、暗煤(半透明和不透明)和丝炭^[3]。这种分类是建立在煤薄片在透镜下用肉眼可以看到其成分特征基础上的。为了实验方便,后来用磨光表面反射率的测定来代替^[4]。

欧洲的一些科学工作者常常把煤的微观成分定义为煤的显微组分^[5],它们来源于植物质。这些显微组分可分为镜质组、壳质组和惰质组(见表1.2)。镜质组和壳质组分别等同于美国命名法中的镜煤和半透明暗煤。又常将惰质组划分成微粒组和丝质组(分别类同于美国命名法中的不透明暗煤和丝炭)。

表 1.2 煤的显微组分和显微组分

显微组分	显微组分
镜质组	无结构镜质体 结构镜质体
壳质组	孢子体 角质体 藻类体 树脂体 蜡
惰质组	微粒体 菌类体 半丝质体 丝质体

(2) 煤岩类型

斯托匹斯把煤的构成宏观地分为四个岩相类型:镜煤、亮煤、