

王绍清 唐跃刚 Harold H. Schobert 著

树皮煤的性质及转化



科学出版社

树皮煤的性质及转化

王绍清 唐跃刚 Harold H. Schobert 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统研究树皮煤(体)的煤岩学、煤化学和煤工艺学等,并深入探讨树皮煤(体)的化学结构特征,总结树皮煤(体)的元素组成、热转化性质和化学结构特征的特性,揭示树皮煤(体)的热转化特点,指出树皮煤的合理利用途径。本书内容翔实丰富,数据全面充分,对研究特殊煤的性质及其清洁利用具有重要价值。

本书可供从事煤岩学、煤化学和煤液化等领域的广大科研工作者和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

树皮煤的性质及转化/王绍清,唐跃刚,(美)舒伯特·哈罗德(Harold H. Schobert)著. —北京:科学出版社,2018.3

ISBN 978-7-03-056990-5

I. ①树… II. ①王… ②唐… ③舒… III. ①煤矿—研究 IV. ①TD163

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 051633 号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年3月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:202 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前,煤炭在我国能源结构中仍然处于主体地位,我国的经济建设仍然依赖于煤炭资源。根据成煤的原始物质和条件不同,煤一般分为腐植煤、腐泥煤和残植煤三大类。虽然我国的煤主要以腐植煤为主,但腐泥煤和残植煤因其特殊的工艺性质,如高氢含量、高挥发分和高焦油产率等,也引起关注。目前,腐泥煤和残植煤利用状况不佳,除了与传统的煤利用方式有关之外,对其特殊性质认识不足也是极为重要的因素。受生活水平提高、环境等因素的影响,人们对用煤的质量要求越来越高。因此,深度分析腐泥煤和残植煤的内在价值,包括研究价值和实用价值,为其合理利用提供建议,使其更有效地发挥特殊煤的资源潜力,具有深刻的理论意义和深远的现实意义。

树皮煤作为特殊残植煤的一种,其研究已持续了八十多年。树皮煤具有高挥发分、低水分、高硫(尤其有机硫)、高熔融性和高焦油产率等特点。树皮煤最主要的煤岩学特色是富含树皮体。树皮体是我国煤中特色的一种稳定组,有其特有的煤岩学特征。但树皮体的命名至今还没有得到国际煤岩学委员会(ICCP)的承认,因为无论从煤岩学角度还是化学性质角度,树皮体与已明确定义的稳定组显微组分之间是否存在本质区别尚不明确。因此,详细研究树皮煤(体)的物理化学性质和转化性质等具有重要的科学意义和实际意义。

基于以上现状,本书以南方树皮煤为主要研究对象,从煤岩学、有机地球化学、煤化学、煤工艺学和物理化学等多学科入手,采用光学显微镜、电子显微镜、微区分析等岩石学分析方法以及热解-气相色谱、气相色谱-质谱、傅里叶变换红外光谱分析、 ^{13}C 核磁共振、原子力显微镜、透射电子显微镜等现代分析测试方法,集中探讨树皮煤(体)的基本属性、物理化学特征和转化性质,分析树皮煤(体)的元素组成特性、结构特性和热转化特性等方面的性质,探讨树皮煤的液化性质,并分析树皮煤的几种利用途径。

本书的特色和取得的一些新认识主要集中在以下几个方面。

1. 研究对象是树皮煤、树皮体

本书研究对象是我国煤中具有特色的显微组分——树皮体,而煤种是特殊煤种——树皮煤。本书力求通过对树皮煤的物理、化学和工艺等方面的性质研究,探讨树皮煤的清洁利用途径。基于此,寻求研究和利用我国特殊煤的新途径。

2. 揭示了树皮煤性质

本书系统总结树皮煤的研究现状,得出树皮煤的基本属性具有四高特点,即氢含量高、H/C 原子比高、挥发分产率高和硫含量高。这些特性对树皮煤的热转化性质及其利用途径有重要影响。

3. 揭示了树皮体的结构性质

树皮体最明显的化学结构特征之一是富含脂肪族,尤其是亚甲基官能团。树皮体的化学结构以低环数的芳香层为主,其中萘、 2×2 和 3×3 的芳香层为主要成分。相比于镜质体,树皮体的芳构化程度、芳环缩合程度比较弱,无序性特征明显。随着煤级的增加,树皮体的形貌特征经历从低煤级的纤维状为主的大分子结构逐渐趋于较为规则的网格状表面结构。当镜质组平均最大反射率增加到 1.12% 时,树皮体和镜质体具有相似的形貌特征(原子力显微镜观察结果)。这些特性为树皮体在国际煤岩学的位置提供了数据支持。

4. 揭示了树皮煤的转化性质

本书研究树皮煤受热后的物理状态和化学结构特征的变化。采用热重分析技术和基氏流动仪对树皮煤进行热重分析和流动性分析,发现树皮煤具有极强的流动性和热解剧烈等特征。研究树皮煤的液化转化性质,并探讨液化过程中的煤岩学特征和化学结构特征的变化。

5. 探讨了树皮煤的利用途径

基于树皮煤的特殊基本属性、结构特征和转化性质,合理地提出树皮煤的三种利用途径,即低温碳化、直接液化和制氢。

全书共 9 章。第 1 章介绍煤的基础理论和研究煤的现代分析测试手段、方法。第 2 章介绍华南二叠纪时期的地史特征。第 3 章介绍树皮煤的基本研究现状,包括分布、沉积环境、成因等内容。第 4 章介绍本书的研究思路、所用样品及其分析测试方法。第 5 章运用煤岩学和煤化学手段及方法,详细研究样品的岩石学特征和化学组成特征等。第 6 章详细研究样品的结构特征,包括物理结构特征和化学结构特征。第 7 章研究样品的热解特征。第 8 章探讨样品的工艺与转化特征,包括基氏流动度和液化性能等内容。第 9 章探讨树皮煤的清洁高效利用途径。

在本书撰写过程中,得到任德贻教授、金奎励教授、彭苏萍教授和代世峰教授的悉心指导,在此谨表示真挚感谢。衷心感谢王永刚教授、曾凡桂教授和凌开成教授提出的宝贵意见和建议。诚恳感谢 Gareth D. Mitchell 先生和艾天杰高级工程师在煤岩样品制作和显微镜操作等环节给予的帮助。衷心感谢中国矿业大学(北

京)地球科学与测绘工程学院的曹代勇教授、赵峰华教授、刘钦甫教授、邵龙义教授、方家虎副教授、马施民副教授和侯慧敏高级实验师及其他老师给予的指导和帮助。真诚感谢煤炭科学研究总院北京煤化学研究所的李克健教授、李文博博士、朱晓苏博士等在煤炭液化方面给予的指导和宝贵建议。诚恳感谢美国宾夕法尼亚州立大学能源研究所的 Gareth D. Mitchell、Ronnie. Wasco、Dania Alvarez-Fansecas、Maria Sobkowiak 和 Alan Benesi 在煤岩分析、热重分析、气相色谱、热解-气相色谱/质谱、红外光谱和 ^{13}C 核磁共振中提供的巨大帮助。感谢榆家梁煤矿杜善周、乐平矿务局、长广矿务局以及水城矿务局的领导和朋友现场给予的大力帮助。真诚感谢吴明远博士、周强博士、秦身钧博士给予的帮助。

本书能够完成离不开国家自然科学基金面上项目“中国煤的特殊显微组分加氢液化的岩石学与地球化学特性的研究”(项目编号:40772101)、青年科学基金项目“树皮体的有机地球化学特征及热变化特性研究”(项目编号:41102097)和面上项目“树皮体的化学结构和煤岩学特性研究”(项目编号:41472132)的资助。同时,本人有幸得到国家留学基金委员会(CSC)的资助,分别于2007年11月至2009年11月和2015年12月至2016年12月赴美国的宾夕法尼亚州立大学(Pennsylvania State University)做联合培养和访问学者研究。本书的绝大部分实验是在宾夕法尼亚州立大学能源研究所、中国矿业大学(北京)的煤炭资源与安全开采国家重点实验室、山西煤炭地质研究所、清华大学摩擦学国家重点实验室和北京大学等单位完成的。对国家自然科学基金委员会和上述单位提供的大力支持和帮助表示由衷感谢。

限于作者水平和采用的实验条件,本书在此领域取得的成绩尚肤浅,不足之处在所难免,而提出的新看法有待于今后进行更深入的研究,引述他人资料 and 观点也会有疏漏,恳请读者提出批评。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 煤基础	1
1.1.1 煤的来源与组成	1
1.1.2 煤的显微组成	2
1.1.3 煤的分类	4
1.1.4 特殊煤的定义和分类	6
1.2 研究煤结构特征的方法	9
1.2.1 固态 ¹³ C 核磁共振	9
1.2.2 傅里叶变换红外光谱	10
1.2.3 热解-气相色谱/质谱	10
1.2.4 X 射线衍射	11
1.2.5 拉曼光谱	11
1.2.6 透射电子显微镜	12
1.2.7 原子力显微镜	12
第 2 章 华南二叠纪时期的地史特征	14
2.1 地史特征	14
2.2 古植物特征	16
第 3 章 树皮煤的基本概况	18
3.1 树皮煤研究简况	18
3.2 树皮煤的分布及储量	19
3.2.1 树皮煤的分布	19
3.2.2 树皮煤的储量	19
3.3 地质背景	20
3.4 树皮煤的成因及煤相	21
第 4 章 研究思路与测试分析方法	23
4.1 研究思路	23
4.2 样品与数据	24
4.2.1 样品采集	24
4.2.2 样品分离	24

4.2.3 以往研究成果引用	25
4.3 样品制备	25
4.4 测试分析方法	26
4.4.1 反射率测定	26
4.4.2 显微组分分析	27
4.4.3 工业分析和元素分析	27
4.4.4 流动性测定	28
4.4.5 热重实验	29
4.4.6 液化实验	29
4.4.7 显微热台实验分析	30
4.4.8 岩石热解实验	31
4.4.9 抽提实验	31
4.4.10 热解-气相色谱/质谱	31
4.4.11 气相色谱	31
4.4.12 气相色谱/质谱	32
4.4.13 固态 ¹³ C 核磁共振测试	32
4.4.14 傅里叶变换红外光谱	32
4.4.15 显微傅里叶红外光谱	32
4.4.16 热解-质谱/红外光谱	33
4.4.17 X 射线衍射	33
4.4.18 拉曼光谱	33
4.4.19 透射电子显微镜	33
4.4.20 原子力显微镜	34
第 5 章 树皮煤(体)的基本特征	35
5.1 化学组成特征	35
5.1.1 树皮煤(体)的化学组成	35
5.1.2 树皮体与其他组分化学组成对比	39
5.2 煤岩学特征	40
5.2.1 树皮煤的光学特征	40
5.2.2 树皮体的分类	42
5.2.3 显微组分含量	43
5.2.4 矿物特征	45
5.2.5 力学性能特征	46
5.3 有机地球化学特征	46
5.3.1 岩石热解分析和总有机碳	47

5.3.2 树皮煤(体)有机质类型	47
5.3.3 树皮煤的成熟度	49
5.3.4 分子组成特征	50
5.3.5 树皮煤沉积环境	54
第6章 树皮煤(体)的结构特征	55
6.1 煤的微观结构	55
6.1.1 煤中的官能团	56
6.1.2 烷基侧链	56
6.2 树皮煤(体)化学结构特征	57
6.2.1 统计法得到的化学结构参数	57
6.2.2 树皮煤的化学结构特征	57
6.2.3 树皮体的化学结构特征	60
6.2.4 不同煤级煤中树皮体官能团的演化特征	64
6.2.5 拉曼光谱特征	65
6.3 树皮煤(体)物理结构特征	67
6.3.1 原子力显微镜观察	67
6.3.2 高分辨透射电子显微镜观察	74
6.3.3 微晶结构的 X 射线衍射研究	79
第7章 树皮煤(体)的热解反应	81
7.1 煤的一般热解反应	81
7.2 树皮煤的热解反应	82
7.2.1 树皮煤的热解特征	82
7.2.2 加热速率对树皮煤热失重行为的影响	85
7.3 不同显微组分的热解性质	85
7.3.1 树皮体的热重特性	85
7.3.2 镜质体的热重特性	86
7.3.3 相同升温速率下树皮煤各组分的热解特性对比	87
7.4 树皮煤(体)的热解-气相色谱/质谱研究	87
7.5 树皮煤的热解-气相质谱/红外光谱的研究	89
第8章 树皮煤(体)的工艺与转化性能	92
8.1 煤的流动性	92
8.2 树皮煤的流动性	93
8.2.1 树皮煤的流动性分析	93
8.2.2 流动性与煤属性的关系	94
8.2.3 流动性与固态 ¹³ C 核磁共振分析	96

8.2.4 流动性和热重的关系分析	96
8.3 树皮煤受热变化特征	97
8.3.1 不同粒度煤显微组分受热特征研究现状	97
8.3.2 树皮煤受热变化特征	98
8.4 树皮煤的液化反应	106
8.4.1 煤的液化	106
8.4.2 液化基础	108
8.4.3 影响煤液化的因素	110
8.4.4 树皮煤的液化性能	114
8.4.5 液化反应中的基本特征变化	117
8.4.6 树皮煤液化过程中的性质变化	120
8.4.7 树皮煤的液化性能探讨	124
第9章 树皮煤的合理利用途径	126
9.1 过去的利用方式	126
9.2 建议利用途径	128
9.2.1 基本特性	128
9.2.2 利用途径探讨	129
参考文献	132
图版	

第 1 章 绪 论

1.1 煤 基 础

1.1.1 煤的来源与组成

煤是一种复杂的非均质性的固体燃料^[1],主要是由高等植物在合适的场所经过漫长的地质时期而形成的,其主要的场所是植物聚集的泥炭沼泽。地质学家认为,煤的形成可以分为两个阶段:泥炭化阶段和煤化阶段。

在泥炭化阶段,成煤植物的各个组分(纤维素、木质素、树脂和蜡等)随着地质条件(氧供给、细菌活性等)的不同而发生不同的变化,经过聚合变成结构复杂的腐植酸,并伴随植物残余和矿物质沉积下来。

煤化阶段是指褐煤、亚烟煤、烟煤,直至无烟煤和变无烟煤的阶段^[2],包括成岩阶段和变质阶段,变质阶段完全是非生物的过程。煤化阶段最主要的特征是煤的物理性质和化学性质发生了很大的变化^[2]。相对于泥炭化阶段,煤化阶段的变化趋向于结构简单化,煤的结构主要由芳香单元和杂环组成,随着温度和压力的升高,煤通过脱氢化作用、脱甲基化作用和脱氧化作用等反应使一些官能团消失。

通过以上两个阶段的变化,煤在化学组成、显微组成等方面有很大的变化。图 1-1 表明随煤化作用的进行,煤的化学组成(H/C 原子比和 O/C 原子比)发生变化。

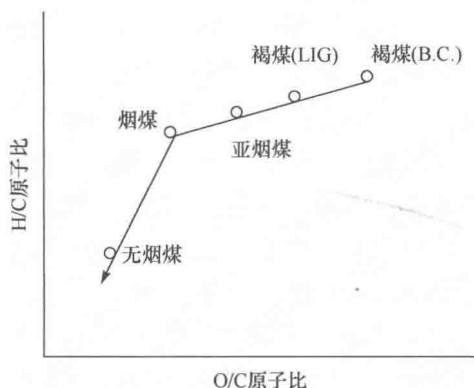


图 1-1 van Krevelen 图说明煤化过程中 H/C 原子比与 O/C 原子比变化轨迹^[3]

Fig. 1-1 A van Krevelen diagram showing changes in composition with coalification

另外,煤也由无机物质组成,这些无机物质主要来源于^[3]:①成煤植物;②矿物质经过搬运,沉积在沼泽中;③煤中新形成的矿物质。为便于应用,把与煤共存的无机物质统称为矿物质。煤中的矿物质主要有黏土矿物、碳酸盐矿物、硫化物矿物、硅化物矿物等,这些矿物含量占总矿物含量的95%以上。相反,煤的微量组成称为微量元素,大部分都是微克每克含量级别^[4]。Swain^[5]、任德贻等^[6]、唐修义等^[7]、代世峰教授课题组^[8~17]和 Hower 等^[18]详细介绍了煤中的微量元素,包括来源、赋存状态和含量等。

1.1.2 煤的显微组成

煤不是均一的有机沉积岩,宏观特征和组成变化多样。所以,与岩石中的矿物质定义类似,把煤的不同有机显微组成定义为显微组分。显微组分一词来源于拉丁语“macerate”(意思是软化)。显微组分首先是由 Stopes^[19]定义的,接下来国际煤岩学委员会(International Commission for Coal Petrology, ICCP)^[20]和 Spackman^[21]从不同的角度对显微组分进行了定义。在显微镜下鉴定显微组分的主要依据有形态、颜色、反射率和突起等特征^[2,20~25]。Stach 等^[2]详细介绍了显微组分的来源、物理性质和化学性质、研究方法及其应用等。随着对显微组分研究的不断深入,对其理解和应用也逐渐加强,新的镜质组分类方案^[24]和惰质组分类方案^[25]被公布。

虽然 Stopes-Heerlen 系统首先提出了显微组分的分类,但是目前广泛应用的是由国际煤岩学委员会提出的显微组分分类方案^[2,20~23]。表 1-1 列出了国际煤岩学委员会^[20~23]和新的惰质组的分类方案^[25]。新的镜质组分类方案^[24]在表 1-2 中列出。本书采用的分类方案是国际煤岩学委员会^[20~23]提出的分类方案,并参考新的镜质组和惰质组分类方案。显微组分首先被分为三类显微组分组,然后各个显微组分组再进一步细分为显微组分。三类显微组分组包括镜质组(低煤级煤中称为腐植组)、稳定组和惰质组。镜质组被认为是成煤植物的木质纤维组织,经过腐植化作用和凝胶化作用而形成的显微组分组。一般而言,镜质组是煤中主要的显微组分。稳定组来源于植物的蜡质和树脂部分,如孢子、角质、树脂等。惰质组主要是由成煤植物在煤形成过程中经过火焚或者氧化等作用而形成的。通常,在给定的煤中,惰质组的反射率最高,其次是镜质组,最后是稳定组。三种显微组分组的化学组成不同,惰质组有高的碳含量和低的氢含量,稳定组有高的氢含量和低的碳含量,镜质组的碳含量和氢含量介于惰质组和稳定组之间。虽然三种显微组分在所有煤级中都存在,但三种显微组分的光学性质随着煤级的升高而趋向于一致。另外,稳定组有较强的荧光强度,富氢镜质组也呈弱荧光性。

表 1-1 国际硬煤显微组分分类方案

Table 1-1 Summary of the macerals classification of hard coals

显微组分组	显微组分	显微亚组分	显微组分
镜质组	结构镜质体	结构镜质体-1 结构镜质体-2	科达树结构镜质体 真菌结构镜质体 木质结构镜质体 鳞木结构镜质体 封印木结构镜质体
	无结构镜质体	均质镜质体 团块镜质体 胶质镜质体 基质镜质体	
	碎屑镜质体		
稳定组	孢子体		薄壁孢子体;厚壁孢子体;小孢子体;大孢子体
	角质体		
	树脂体	镜质树脂体	
	木栓质体		
	藻类体	结构藻类体;层状藻类体	皮拉藻类体;轮奇藻类体
	荧光体		
	沥青质体		
	渗出沥青质体		
	碎屑壳质体		
惰质组	半丝质体		
	丝质体		
	菌类体(Funginite)		
	分泌体(Secretinite)		
	粗粒体		
	微粒体		
	碎屑惰质体		

表 1-2 镜质组的分类
Table 1-2 Classifaction of Vitrinite

显微组分亚组	显微组分
结构镜质亚组(Telovitrinite)	结构镜质体(Telinite) 凝胶结构镜质体(Collotelinite)
碎屑镜质亚组(Detrovitrinite)	碎屑镜质体(Vitrodetrinite) 凝胶碎屑体(Collodetrinite)
凝胶镜质亚组(Gelovitrinite)	团块凝胶体(Corpogelinite) 凝胶体(Gelinite)

1.1.3 煤的分类

为服务于科学研究,或方便于煤炭应用,学者对煤进行了分类。到目前为止,大量煤炭分类已经被提出^[26, 27],如 Seyler 分类系统(以元素组成为指标,主要指碳和氢的值)、美国材料与试验协会分类系统(以固定碳含量和发热量为指标(无水无矿物基))(表 1-3)、英国分类系统(以挥发分(无水无矿物基)和葛-金(Gray-King)分类(以焦炭类型为指标))、国际煤炭分类(以挥发分(干燥无灰基)和发热量(无灰基)为指标)以及中国的煤炭分类(主要以挥发分(干燥无灰基)、黏结指数等为指标)(表 1-4),在这些分类中,美国材料与试验协会分类系统(ASTM D388-05) 得到广泛应用。此外,根据平均最大镜质组反射率划分的煤级可以提供辅助信息(表 1-5)。

表 1-3 美国材料与试验协会煤炭分类^a
Table 1-3 ASTM classification of coals by rank

煤级	组	固定碳 (干燥无矿物基)/%	挥发分 (干燥无矿物基)/%	发热量 (水分 ^b ,无矿物基)/(Btu/lb ^a)	结焦性
无烟煤	变无烟煤	>98	<2		无结焦性
	无烟煤	92~98	2~8		
	半无烟煤 ^c	86~92	8~14		
烟煤	低挥发分	78~86	14~22		一般结焦性 ^c
	中挥发分	69~78	22~31		
	高挥发分 A	<69	>31	>14000 ^d	
	高挥发分 B			13000 ^d ~14000	结焦性
	高挥发分 C			11500~13000	
				10500~11500	

续表

煤级	组	固定碳 (干燥无矿物基)/%	挥发分 (干燥无矿物基)/%	发热量 (水分 ^b , 无矿物基)/(Btu/lb [*])	结焦性
亚烟煤	亚烟煤 A			10500~11500	无结焦性
	亚烟煤 B			9500~10500	
	亚烟煤 C			8300~9500	
褐煤	褐煤 A			6300 ^f ~8300	
	褐煤 B			<6300	

- a 此分类不适合特定煤;
- b 水分是指内在水分;
- c 如果结焦,划分为低挥发分烟煤中;
- d 若煤含固定碳等于或者大于 69%,应该根据固定碳进行分类;
- e 烟煤组中有无结焦性的变化,高挥发分 C 烟煤组中有明显的例外;
- f 编辑更正。
- * 英制单位 1Btu/lb≈2. 326kJ/kg。

表 1-4 中国煤炭分类简表
Table 1-4 Simplified form of Chinese coal classification

类别	分类指标					
	V _{daf} /%	G	Y/mm	b/%	P _M /%**	Q _{gr,mat} /(kg/MJ)***
无烟煤	≤10. 0					
贫煤	>10. 0~20. 0	≤5				
贫瘦煤	>10. 0~20. 0	>5~20				
瘦煤	>10. 0~20. 0	>20~65				
焦煤	>20. 0~28. 0	>50~65				
	>10. 0~28. 0	>65*	≤25. 0			
肥煤	≥10. 0~37. 0	(>85)*	>25. 0	*		
1/3 焦煤	>28. 0~37. 0	>65*	≤25. 0	(≤220)		
气肥煤	>37. 0	(>85)*	>25. 0	(>220)		
气煤	>28. 0~37. 0	>50~60				
	>37. 0	>65	≤25. 0	(≤220)		
1/2 中黏煤	>20. 0~37. 0	>30~50				
弱黏煤	>20. 0~37. 0	>5~30				
不黏煤	>20. 0~37. 0	≤5				

续表

类别	分类指标				
	$V_{daf}/\%$	G	Y/mm	$b/\%$	$P_M/\%^{**} \quad Q_{gr,maf}/(\text{kg/MJ})^{***}$
长焰煤	>37.0	≤ 35			>50
褐煤	>37.0				≤ 30
	>37.0				$>30\sim 50$

注： V_{daf} 为干燥无灰挥发分； G 为烟煤的黏结指数； Y 为烟煤的胶质层最大厚度； b 为烟煤的奥亚膨胀度； P_M 为煤样的透光率； $Q_{gr,maf}$ 为煤的恒湿无灰基高位发热量。

* 对于 $G>85$ 的煤，再用 Y 值或 b 值来区分肥煤、气肥煤与其他煤类。当 $Y>25.0\text{mm}$ 时，应划分为肥煤或气肥煤；当 $Y\leq 25.0\text{mm}$ 时，根据其 V_{daf} 的大小而划分为焦煤、1/3 焦煤或者气煤。按 b 值划分类别时， $V_{daf}\leq 28.0\%$ 、 $b>150\%$ 的为肥煤； $V_{daf}>28.0\%$ 、 $b>22.0\%$ 的为肥煤或气肥煤；如按 b 值和 Y 值划分的类别有矛盾，以 Y 值划分的类别为准。

** 对于 $V_{daf}>37.0\%$ 、 $G\leq 5$ 的煤，再以煤样的透光率 P_M 来区分其为长焰煤或褐煤。

*** 对于 $V_{daf}>37.0\%$ 、 P_M 为 $30\%\sim 50\%$ 的煤，再测 $Q_{gr,maf}$ ，若 $Q_{gr,maf}>24\text{MJ/kg}(5700\text{cal/g})$ ，应划分为长焰煤，否则为褐煤。

表 1-5 油浸下根据镜质组反射率划定的煤级

Table 1-5 Coal rank classed determined by Vitrinite reflectance limits in oil

美国 ^[26]		中国 ^[28]	
煤级	最大反射率 $R_{max}/\%$	煤级	最大反射率 $R_{max}/\%$
无烟煤	>3.00	无烟煤	>2.50
半无烟煤	$2.05\sim 3.00$	贫煤	$2.00\sim 2.50$
低挥发分烟煤	$1.50\sim 2.05$	瘦煤	$1.70\sim 2.00$
中挥发分烟煤	$1.10\sim 1.50$	焦煤	$1.20\sim 1.70$
高挥发分烟煤 A	$0.71\sim 1.10$	肥煤	$0.90\sim 1.20$
高挥发分烟煤 B	$0.57\sim 0.71$	气煤	$0.65\sim 0.90$
高挥发分烟煤 C	$0.47\sim 0.57$	长焰煤	$0.50\sim 0.65$
亚烟煤	<0.47	褐煤	<0.50

1.1.4 特殊煤的定义和分类

对于特殊煤的定义，学者给出了诠释。韩德馨等^[29]指出特殊煤是指自然界中某些煤由于其成因、性质、煤岩组成具有特殊性，或由于某些化学性质、元素富集而具有与众不同的工艺性能和用途，如焦油率高的残植煤、腐泥煤和其他富氢煤、低灰低硫的优质煤等。曾勇^[30]指出特殊煤是指自然界中由于成因、物理化学性质、煤岩组成等具有特殊性，或因富集某种元素而具有与众不同的化学性质、工艺性质及用途的一些煤种。

基于学者的研究可以得出,特殊煤具有特殊的自身属性和特殊的工艺性质,因此,特殊煤是指煤中某个元素或成分(高或低)、成因和工艺性质与一般煤有所不同,其含量特高或特低,并具有一定开发规模的煤炭资源。这些特性包括灰分很低或可选性好、微量元素富集、显微组分组成特殊、焦油产率高、蜡含量高^[31]。由此可见,特殊煤可以从组成,也可以从性质等角度探讨煤的特殊性,说其特殊,意味着煤中的某种或者某些组分特殊或其含量过高,导致其性质表现出特殊性。论其特殊,就表示有别于普通,有其特殊的价值,只是已被人们认识或未被认识而已,而这与科技水平、经济发展等因素有关。特殊煤炭资源是一种宝贵资源,可充分利用其特殊性质进行有针对性的加工利用,最大限度地发挥其特殊性质的优势。

唐跃刚教授等^[31]通过对全国煤炭资源的调查、整理分析,对特殊煤炭资源进行了划分。其依据为:①划分应遵循资源性、经济性与实用性(用途);②按特殊要素进行划分大类;③要素内以其属性归类,即划分类型;④不同类型内个例划分种原则。具体分类见表 1-6。其划分依据为:按特殊的成分、成因和性质划分为高元素特殊大类煤、原生成因特殊大类煤、次生成因特殊大类煤、特殊工艺大类煤;先按元素的工业价值划分为高有益元素煤和按环境属性划分为高有害元素煤两种类型,再依据某个有益(有害)元素及多个有益(有害)元素的富集划分为高锗煤、高镓煤、高铌煤、高稀土煤、高多有益元素煤和高硫煤、高汞煤、高砷煤、高硒煤、高氯煤、高磷煤、高多金属煤;按聚煤成因特殊性划分为残植煤、腐泥煤、腐植腐泥煤、高惰质组煤等,按富集成分划分为高惰质组煤、树脂残植煤、角质残植煤、孢子残植煤、树皮残植煤、高壳质煤(如白泡煤)、藻煤、胶泥煤、烛煤、煤精等特殊煤种;按次生地质条件划分构造煤、风氧化煤、热变煤(即热水煤、接触变质煤、燃烧变质煤、构造煤等次生成因煤,甚至天然焦);在特殊工艺性煤大类中,根据特殊成分及性质划分为单一成分煤(高腐植酸煤、高蜡煤)、双成分煤(特高挥发分特高油含量煤、高可磨性低灰煤、高活性低灰煤、特低铁低灰煤)、三成分煤(高密度煤、低灰煤、低硫无烟煤)以及多成分特殊的特质煤(多元素煤、低含量煤、低灰煤、低硫煤,甚至是超纯煤)。

表 1-6 特殊煤炭资源的划分目录方案

Table 1-6 Scheme of classification of special coal type resources

大类	类型	种	特殊性
特殊高元素煤	高有益元素煤	高锗煤	Ge
		高镓煤	Ga
		高铌煤	Nb
		高稀土煤	REE
		高多有益元素煤	多元素